

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

David Mádr

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky

Stanoviště pro měření účinnosti
asynchronního motoru

Stand for measuring the efficiency of an
asynchronous motor

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. David Mádr

Studijní program:

N2661 Projektování elektrických systémů a technologií

Téma:

Stanoviště pro měření účinnosti asynchronního motoru
Stand for measuring the efficiency of an asynchronous motor

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši problematiky měření účinnosti asynchronního motoru a diskutujte možné způsoby realizace školního stanoviště vhodné pro toto měření.
2. Vyberte variantu stanoviště tak, aby byla realizovatelná s využitím stávajícího a dostupného vybavení katedry.
3. Proveďte a realizujte návrh elektrické instalace i ochran stanoviště a do návrhu zahrňte možnost napájení asynchronního motoru z měniče kmitočtu.
4. Uveďte stanoviště do pilotního provozu a vytvořte návod jeho obsluhy.
5. Realizujte měření účinnosti motoru v závislosti na jeho zatížení.
6. Vyhodnoťte výsledky získané měřeními účinnosti motoru na tomto stanovišti.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. J. Bašta, V. Kulda, Z. Zoubek, J. Kopeček a kol.: Měření na elektrických strojích - část 1 až 4, SNTL Praha
2. W., Ma, L., Bai: Energy-saving Principles and Technologies for Induction Motors, John Wiley & Sons, 2017, ISBN 9781118981061
3. F., Parasiliti, P., Bertoldi: Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Springer Science & Business Media, 2003, ISBN 9783540006664
4. V. Stýskala: Analytical analysis of selected topics from the theory of asynchronous el. drives, habilitation thesis, VSB-TU Ostrava, 2006

Národní normy řady: ČSN 35 0000, ČSN EN 60034, ČSN 33 2000, ČSN EN 50081
manuály firmy Siemens, Langlois, Schneider Electric

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Orság, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Vítězslav Stýskala, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 30.4.2019



.....

Podpis studenta

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Orságovi, Ph.D za cenné rady v průběhu vypracování práce a pomoc při realizaci pracoviště. Dále bych rád poděkoval vedoucímu katedry elektrotechniky doc. Ing. Vítězslavu Stýskalovi, Ph. D. za zajištění finančních prostředků potřebných na realizaci pracoviště, díky kterým bylo realizaci pracoviště možné uskutečnit.

Abstrakt

Cílem vypracování této diplomové práce je vytvoření funkčního měřicího pracoviště pro měření účinnosti motoru se systémem LANGLOIS. V první části této diplomové práce je rozebrána problematika měření účinnosti asynchronního motoru. Další část se věnuje několika návrhům měřicího pracoviště, včetně porovnání navrhovaných variant a jejich provedení. Následuje část realizace s popisem získaných zkušeností z realizace a uvedení do provozu. Poslední část práce se věnuje měření účinnosti asynchronního motoru a zhodnocení naměřených hodnot.

Klíčová slova

Účinnost asynchronního motoru, LANGLOIS, Eplan, CAD

Abstract

The aim of this diploma thesis is to create a functional measuring station for measurement efficiency of an asynchronous motor with LANGLOIS system. The first part of this diploma thesis deals with the issue of measuring the efficiency of an asynchronous motor. The next part deals with several designs of the measuring station, including the comparison of the proposed variants and their implementation. Part of the implementation follows, with a description of the experience gained from the implementation and commissioning. The last part of the thesis deals with measurement of asynchronous motor efficiency and evaluation of measured values.

Key words

Efficiency of an asynchronous motor, LANGLOIS, Eplan, CAD

Obsah

1 Seznam použitých symbolů a zkratk	8
2 Seznam ilustrací a seznam tabulek	9
Úvod	10
1 Účinnost asynchronního motoru	11
1.1 Asynchronní motor	12
1.2 Funkce asynchronního motoru	14
1.3 Ztráty v asynchronním motoru	17
1.4 Měření účinnosti asynchronního motoru	24
1.5 Třídy účinnosti	36
1.6 Legislativa	40
2 Návrh pracoviště	41
2.1 Zadání pro pracoviště laboratorní pracoviště	41
2.2 Laboratorní sestava Langlois	41
2.2.1 Elektromechanická část	41
2.2.3 Měřicí přístroje	44
2.3 Projektová dokumentace navržených variant měřícího pracoviště	47
2.3.1 První navržená varianta měřícího pracoviště	48
2.3.2 Druhá navržená varianta měřícího pracoviště	51
2.3.3 Návrh provedení rozvaděčové skříně	53
3 Realizace	56
3.1 Fáze realizace	56
3.1.1 Fáze prvotního návrhu a výběru varianty	56
3.1.2 Výroba rozvaděče	56
3.1.3 Programování PLC LOGO!	57
3.1.4 Zapojení pracoviště	61
3.2 Obsluha měřícího pracoviště	61
4 Ověření účinnosti asynchronního motoru	64
5 Závěr	67
6 Seznam použité literatury	69
7 Seznam příloh	71

1 Seznam použitých symbolů a zkratk

CAE	Počítačem podporované inženýrství
ČSN	Česká technická norma
DIN lišta	Nosná montážní lišta do rozvaděčů
EN	Evropská norma
FC	Označení symbolu jističe a motorového spouštěče
TA	Označení symbolu frekvenčního měniče
KA	Označení pomocného stykače
KH	Označení měřících přístrojů
KF	Označení řídicího systému
QA	Označení výkonového stykače a vypínače
N	Nulový potenciál sítě TN-S
PE	Ochranné uzemnění
PLC	Programovatelný logický automat
XD	Označení svorkovnice
XC	Označení zásuvky, konektoru
<i>kv</i>	Činitel vinutí
m_1	Činitel statoru
m_2	Činitel rotoru

2 Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obr. 1: Klecové provedení rotoru	12
Obr. 2: Výrobní štítek asynchronního motoru s klecovým vynutím [7]	13
Obr. 3: Asynchronní motor [8].....	17
Obr. 4: Zobrazení ztrát vznikajících v elektrických motorech [1]	18
Obr. 5: Velikost přídavných ztrát definována normou ČSN EN 60034-2-1	22
Obr. 6: Posloupnost zkoušek pro určení účinnosti motoru metodou zbytkových ztrát	26
Obr. 7: Vyhlažování zbytkových ztrát dle ČSN EN 60034-2-1 ed.2	30
Obr. 8: Posloupnost zkoušek pro metodu součtu ztrát s přídavnými ztrátami při zatížení z přirozené tolerance dle ČSN EN 60034-2-1 ed. 2.....	32
Obr. 9: Vektorový diagram pro získání vektoru proudu ze zkoušky při sníženém napětí [13].....	34
Obr. 10: Vzor zkušebního protokolu pro určení účinnosti motoru ze zbytkových ztrát	35
Obr. 11: Znázornění tříd účinnosti motorů [18]	36
Obr. 12: Závislost účinnosti jednotlivých tříd účinnosti motoru na jmenovitém výkonu [18]	38
Obr. 13: Svorkovnice motoru.....	41
Obr. 14: Výrobní štítek motoru.....	42
Obr. 15: Zapojení vynutí motoru do hvězdy a trojúhelníku.....	42
Obr. 16: Elektromagnetické práškové brzdy a její řez	43
Obr. 17: Stejnoseměrné tachodynamo instalované na soustrojí.....	44
Obr. 18: Měřicí přístroj Langlois GRANMECA.....	45
Obr. 19: Měřicí přístroj Langlois DIGIWATT	45
Obr. 20: Langlois MECASIM.....	46
Obr. 21: Real Time měřicí systém Langlois VISIREAL	46
Obr. 22: Konfigurační nástroj TIA Selection tool.....	52
Obr. 23: PLC přehled rozšiřujícího modulu.....	53
Obr. 24: Pohled na montážní desku navrhovaného rozvaděče.....	54
Obr. 25: Programovací prostředí LOGO!Soft Comfort V8.0.....	57
Obr. 26: Výběr napájení motoru	58
Obr. 27: Ovládání elektromagnetických práškových brzd	59
Obr. 28: Řízení motoru	60
Obr. 29: Signalizace běhu motoru.....	60
Obr. 30: Laboratorní sestava pro měření účinnosti asynchronního motoru	61
Obr. 31: Pohled na ovládací prvky rozvaděče.....	62
Obr. 32: Schéma zapojení měřicího obvodu	64
Tabulka 1: Závislost synchronních otáček stroje na počtu pólů	15
Tabulka 2: Procentuální rozdělení ztrát 4 pólového motoru [15].....	22
Tabulka 3: Tabulka metod měření účinnosti asynchronního motoru dle ČSN EN 60034-2-1 ed. 2.....	25
Tabulka 4: Technologické možnosti dosažení jednotlivých tříd účinnosti	37
Tabulka 5: Naměřené a vypočtené hodnoty	65

Úvod

Tato diplomová práce je završením mého dvouletého navazujícího magisterského studia studijního oboru Projektování elektrických systémů a technologií. Práce se zabývá návrhem měřicího pracoviště se systémem Langlois pro měření účinnosti asynchronního třífázového motoru, jeho realizací a následným měřením účinnosti motoru. Systém Langlois byl v minulosti zakoupen katedrou elektrotechniky, avšak nebyl do realizace této práce odzkoušen a provozován, jelikož nebylo vyřešeno napájení a ovládání pracoviště tak, aby bylo bezpečné pro i studenty.

První část této práce se věnuje teoretickému základu, ve kterém jsou popsány ztráty vznikající v asynchronním motoru a možnostem jejich omezení ke zvýšení účinnosti motoru. Dále se věnuje možnostem měření účinnosti, rozdělení motorů do účinnostních tříd IE, popisu jednotlivých tříd účinnosti a legislativní a normativní stránce zabývající se touto problematikou.

Druhá část práce se zabývá samotným návrhem měřicího pracoviště. Počáteční návrh byl několikrát modifikován a upravován tak, aby pracoviště plnilo všechny požadované funkce, které byly v průběhu celého projektu přidávány a požadovány zainteresovanými osobami. Vznikly dvě varianty ovládání, a to pomocí reléové logiky a pomocí programovatelného logického modulu LOGO! firmy Siemens, z nichž měla být následně vybrána jedna, a ta měla být realizována s ohledem na finanční možnosti katedry elektrotechniky.

Třetí část práce se věnuje průběhu realizace pracoviště, tvorbě programu pro správnou funkci programovatelného modulu LOGO!, zapojení, a uvedení celého měřicího pracoviště do provozu. Zabývá se taktéž nabitými praktickými zkušenostmi z realizace a problémy, kterým bylo nutné při realizaci čelit.

Čtvrtá část práce je věnována samotnému měření účinnosti třífázového asynchronního motoru, který je součástí sestavy, ověření hodnot uváděných výrobcem a celkovému zhodnocení měření.

Závěr práce se věnuje zhodnocení přínosu vybudovaného měřicího pracoviště studentům VŠB – Technické univerzity Ostrava.

1 Účinnost asynchronního motoru

Účinnost motoru je ukazatelem efektivnosti, se kterou je přeměňována elektrická energie na energii mechanickou. Vyjadřuje se poměrem mechanického výkonu P_2 na hřídeli motoru ku elektrickému příkonu P_1 .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.1)$$

Častěji se však používá vyjádření účinnosti motoru v procentech, tak jak účinnost definují normy, vládní nařízení a nařízení EU např. 640/2009.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (1.2)$$

Elektrické motory tvoří velkou část celkové spotřeby elektrické energie a v průmyslu je tak dokonce dle odborných odhadů elektromotory spotřebováno přibližně 60 až 70 % veškeré spotřeby elektřiny [8]. Motory však nejsou používány pouze v průmyslu, ale taktéž v domácnostech pro různé účely, jako jsou klimatizace, ventilátory, čerpadla atd. Vzhledem k tomu, že mnoho těchto zařízení je v provozu v průběhu celého roku je důležité volit motory s vyšší účinností, což přináší nemalé finanční úspory.

Pro pochopení problematiky účinnosti asynchronního motoru je nutné popsat si funkci motoru, ztráty, které v jednotlivých částech vznikají a taktéž možnosti, jak tyto ztráty snížit. Jelikož laboratorní sestava Langlois obsahuje třífázový asynchronní motor, který je v dnešní době jednoznačně nejpoužívanějším, bude popsán právě asynchronní motor.

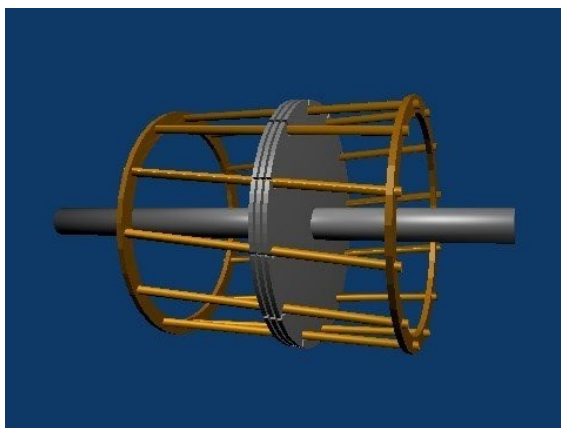
1.1 Asynchronní motor

Asynchronní motor je střídavý elektrický točivý stroj, který přeměňuje elektrickou energii na mechanickou. Jedná se o střídavý elektrický stroj, u něhož poměr otáček při zatížení a kmitočtu napájecí soustavy, ke které je připojen, není konstantní. Je nejjednodušším a nejlevnějším elektrickým strojem, který se vyrábí v malých a středních výkonech ve velkých sériích. Tyto motory tak lze pořídit s výkonem od několika wattů až do desítek megawattů. Asynchronní motory se v minulosti používali v pohonech, které nevyžadovaly změnu rychlosti otáčení, neboť otáčky asynchronního stroje závisí na rychlosti točivého pole. Dnes však lze nalézt tyto motory i v aplikacích, kde je nutné otáčky motoru regulovat jako například ventilátory, čerpadla, pračky, kompresory, stavební stroje, výtahy, jeřáby, některé obráběcí stroje, pohony dopravníků, apod.

Asynchronní motor se skládá ze dvou základních částí, a to statoru a rotoru.

Statorová část složená z litinové kostry a dvou ložiskových štítů. Do kostry statoru jsou umístěny statorové plechy, které mají na vnitřním obvodu drážky, do kterých je uloženo obvykle třífázové vinutí. Toto vinutí bývá nejčastěji dvouvrstvé, což zlepšuje elektromagnetické vlastnosti.

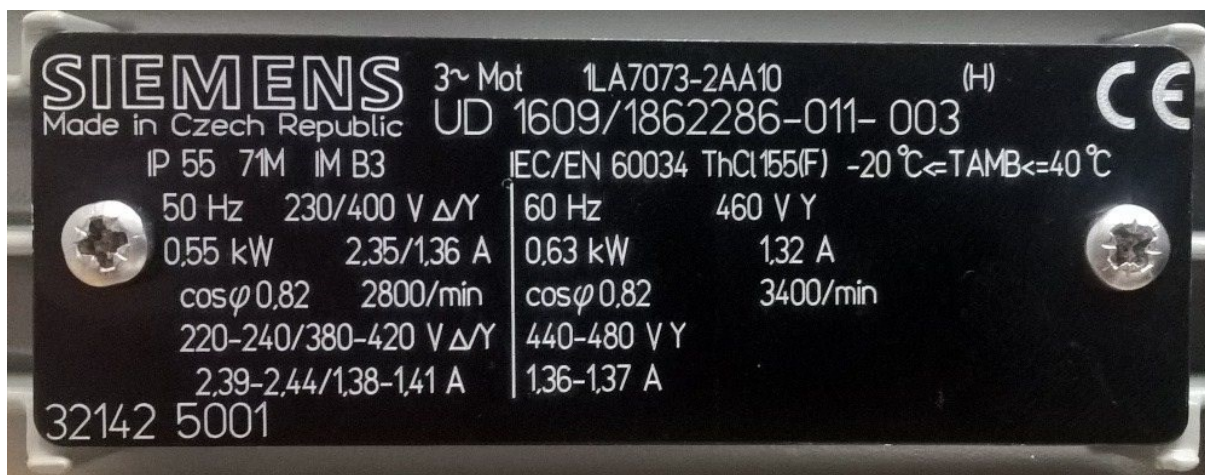
Podle konstrukce rotoru rozlišujeme motory klecové viz. obrázek 1, které mají rotorové vinutí uzavřené do klece, jsou robustního provedení a nevyžadují ani komutátor nebo kroužky a kartáče. Dalším provedením je motor s kroužkovým rotorem. Z provedení rotoru dále plynou i rozdílné možnosti řízení otáček. [4]



Obr. 1: Klecové provedení rotoru

Rotorová část se výrazně liší podle konstrukčního provedení rotoru. V obou případech provedení jsou na hřídeli motoru nalisovány rotorové plechy s drážkami. Tyto plechy tvoří druhou část magnetického obvodu. Motory s kroužkovým rotorem mají rotor izolovaně vinutý s trojfázovým vinutím vyvedeným ke 3 kroužkům, z nichž lze přes kluzné kontakty vést proud ke spouštěcím odporům. Druhým konstrukčním provedením je motor s rotorem klecovým. Tento rotor je také tvořen rotorovými plechy s drážkami na vnější straně, do kterých jsou usazeny rotorové tyče z hliníku, mědi nebo mosazi a na stranách spojeny kroužky nakrátko. Tomuto provedení se také říká motor s kotvou nakrátko. [4]

Základní údaje, které jsou důležité pro uživatele stroje uvádí výrobce motoru na výrobním štítku. Výrobní štítek je důležitou součástí stroje a údaje na něm uvedené by měli být čitelné po celou dobu životnosti stroje.



Obr. 2: Výrobní štítek asynchronního motoru s klecovým vynutím [7]

Štítek stroje obsahuje tyto údaje:

- Druh stroje – asynchronní motor
- Druh proudu – jednofázový, třífázový
- Jmenovitý výkon stroje (kW)
- Jmenovité statorové napětí (V)
- Jmenovitý statorový proud (A)
- Jmenovitý kmitočet (Hz)
- Jmenovité otáčky (min^{-1})
- Jmenovitý účinník (-)
- Zapojení statorového vinutí – pro zapojení do hvězdy označeno Y, do trojúhelníka D
- Zapojení rotorového vinutí – Y, D, pouze asynchronních motorů s vinutým rotorem a kroužky
- Rotorové napětí (V)
- Rotorový proud (A)
- Druh zatížení – např. S1 pro trvalý chod
- Tvar stroje – označení IM (international mounting), např. patkový, přírubový
- Stupeň ochrany před vniknutím cizích těles a vody – označení IP (international protection)
- Druh chlazení – označení IC (international cooling), vyjadřuje způsob chlazení a použité chladivo
- Třída izolace – vyjadřuje, jakou horní hranici teploty musí motor vydržet
- Druh pracovního prostředí
- Třída účinnosti – označena IE (international efficiency), např. IE2

Mimo výše uvedené parametry výrobní štítek obsahuje název výrobce včetně sídla, rok výroby, typové číslo, počet pólů, hmotnost a označení normy, podle které byl vyroben. V případě, že je motor určen pouze pro jeden směr otáčení, je smysl otáčení uveden na kostře motoru. Směrem otáčení je míněn směr, kterým se otáčí hřídel při pozorovatele. Například pravotočivý motor se otáčí ve směru pohybu hodinových ručiček.

1.2 Funkce asynchronního motoru

Rotor asynchronního stroje není elektricky spojen se statorem. Výkon se tedy do rotoru přenáší elektromagnetickou indukcí, proto je označován jako stroj indukční. Základem funkce asynchronního motoru je vznik točivého magnetického pole. Trojfázovým vinutím připojeným na trojfázovou síť protéká trojfázový proud. Tento proud vyvolá ve vzduchové mezeře stroje, která by měla být co nejmenší, aby byla vazba co nejlepší, točivé magnetické pole, které se otáčí synchronními otáčkami n_1 nebo také úhlovou rychlostí

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (1.2. 1)$$

Síločáry magnetického pole protínají vodiče statorového a rotorového vinutí a indukují v nich napětí. Magnetická vazba asynchronního stroje je stejná jako magnetická vazba mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru. Napětí indukované ve statorovém vinutí působí proti napětí sítě, čímž omezuje statorový proud na hodnotu, pro kterou je stroj navržený. Napětí indukované v rotorovém vinutí vyvolá proud. [4] Tento rotorový proud má frekvenci:

$$f_2 = \frac{\omega_s - \omega}{2\pi} \cdot p \quad (1.2. 2)$$

Na rotorové vinutí, nacházející se v magnetickém poli a je protékáno proudem, působí mechanická síla, stejně jako na každý vodič v magnetickém poli. Dle Lenzova zákona se vodiče rotoru začnou vychylovat ve směru otáčení magnetického pole, protože se svými účinky snaží potlačit příčinu, pro kterou se v nich indukují napětí a následně jimi protéká proud.

U obou konstrukčních druhů rotorových vinutí indukují točivé pole statoru vícefázové napětí a proudy, které mohou dávat moment společně s točivým polem. [4] Elektromagnetický moment je úměrný:

$$M \approx \Phi \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \sin\beta \quad (1.2. 3)$$

Φ	magnetický tok ve vzduchové mezeře
I_2	pracovní proud rotoru
φ_2	časový úhel mezi U_2 a I_2
β	prostorový úhel mezi magnetickým tokem Φ a I_2

Při postupném zvyšování otáček se snižuje relativní pohyb vodičů rotoru vůči točivému poli a zpomaluje se časová změna magnetického toku vázaného vodiči, což má za příčinu i snížení indukovaného napětí, protékajícího proudu i mechanické síly na vodiče. Tímto dojde k ustálení otáček na jejich určité hodnotě nižší, než jsou synchronní otáčky magnetického pole [4].

Synchronních otáček, které jsou závislé na počtu pólů stroje, motor nemůže rotor nikdy dosáhnout, protože by při nich nebyl žádný relativní pohyb vodičů rotoru vůči točivému poli, neindukovalo by se napětí, netekl by žádný proud a nevznikal by točivý moment. Synchronní otáčky jsou:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.2. 4)$$

Tabulka 1: Závislost synchronních otáček stroje na počtu pólů

Počet pólů p	Synchronní otáčky stroje n_s [min⁻¹]
1	3000
2	1500
3	1000
4	750

Pokles otáček motoru při zatížení se nazývá skluz a nejčastěji se uvádí v procentech. Skluz u malých motorů může být i 10 % avšak u motorů velkých výkonů bývá i menší než 1 %.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\frac{\omega_1}{p} - \Omega}{\frac{\omega_1}{p}} \quad (1.2. 5)$$

n, Ω otáčky a mechanická úhlová rychlost rotoru
 p počet pólů stroje
 f_1 statorová frekvence
 ω_1 úhlová rychlost magnetického pole

Pomocí skluzu lze jednoduše vypočítat moment motoru z Klossova vztahu

$$M = \frac{M_{MAX}}{\frac{s}{s_z} + \frac{s_z}{s}} \quad (1.2. 6)$$

Vinutí indukčních strojů odpovídá statorovému vinutí synchronních strojů, neboť jak ve statoru, tak v rotoru indukčních strojů se uzavírají vícefázové proudy. Aby se magnetizační proud ze sítě příliš nezvětšoval, je vzduchová mezera co nejmenší a drážky polo zavřené. Výjimkou jsou motory se statorovým vinutím napájené vysokým napětím, které mají drážky otevřené, do kterých se vkládají předem formované a izolované cívy. Tyto drážky se také někdy uzavírají magnetickými klíny. Otevřené drážky vyvolají při malé vzduchové mezeře velký rozptyl magnetického toku a tím i velké ztráty na povrchu rotoru i v jeho vinutí [4].

Jak již bylo zmíněno, asynchronní motor je indukčním strojem, z čehož vyplývá, že velikost rotorového napětí a proudu závisí na velikosti skluzu. Ze základní rovnice pro výpočet indukovaného napětí ve střídavých strojích

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \cdot k_v \quad (1.2. 7)$$

lze odvodit ideální indukované napětí ve statoru

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi \cdot k_{v1} \quad (1.2. 8)$$

a ideální napětí indukované v rotoru

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \Phi \cdot k_{v2} \quad (1.2. 9)$$

kteří je největší v případě, že rotor stojí.

V případě, kdy je motor naprázdno a v ideálním případě, kdy se rotor točí synchronními otáčkami, $n = n_s$ a tedy $s = 0$ je rotorové napětí nulové. Napětí indukované v rotoru při libovolných otáčkách je

$$U_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \Phi \cdot k_{v2} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \Phi \cdot k_{v2}, \quad (1.2. 10)$$

tedy

$$U_2 = s \cdot U_{i2} = s \cdot U_{20}, \quad (1.2. 11)$$

kde U_{20} je napětím naprázdno.

Převod, který je definovaný stejně jako u transformátoru je roven

$$p_U = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \quad (1.2. 12)$$

Indukované napětí v rotoru vytvoří proud I_2

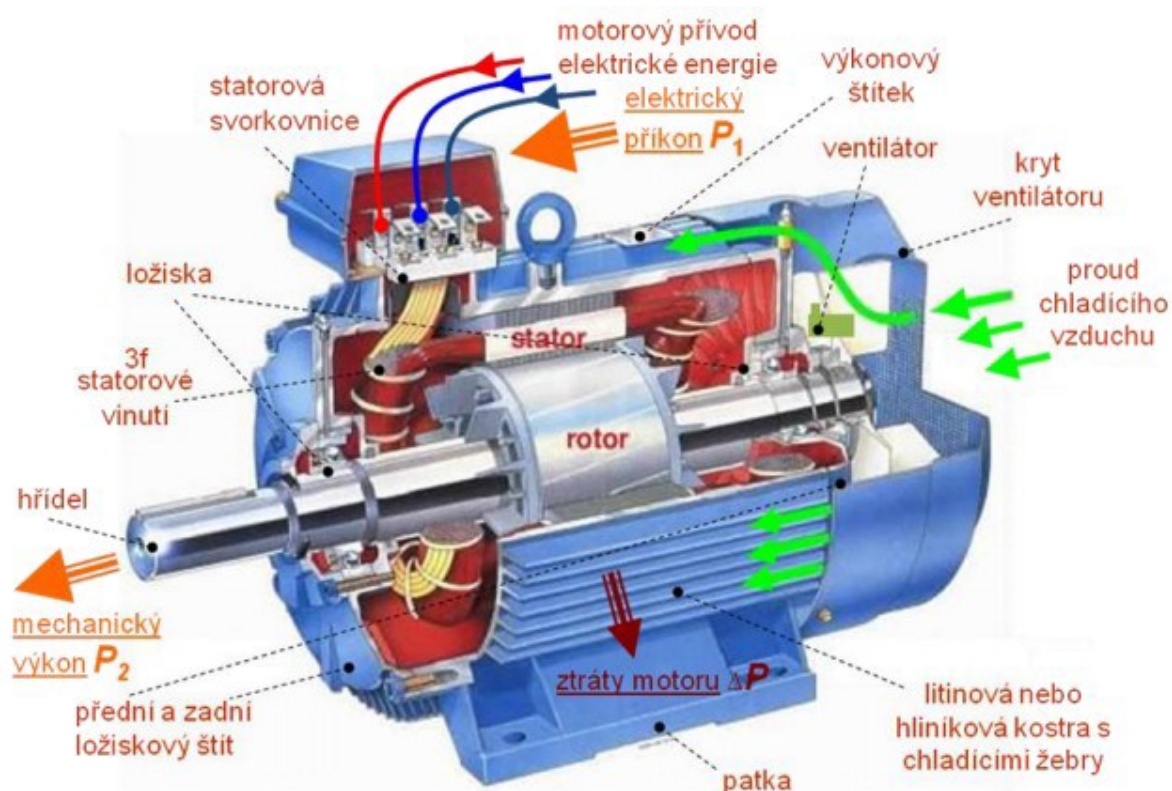
$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + (2\pi \cdot f_2 \cdot L_2)^2}} = \frac{s \cdot U_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}} \quad (1.2. 13)$$

po upravení rovnice je rotorový proud roven

$$I_2 = \frac{U_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (1.2. 14)$$

Z této rovnice je patrné, že asynchronní stroj se při všech otáčkách chová jako transformátor, který je na sekundární straně zatížen ohmickým odporem R_2/s .

1.3 Ztráty v asynchronním motoru



Obr. 3: Asynchronní motor [8]

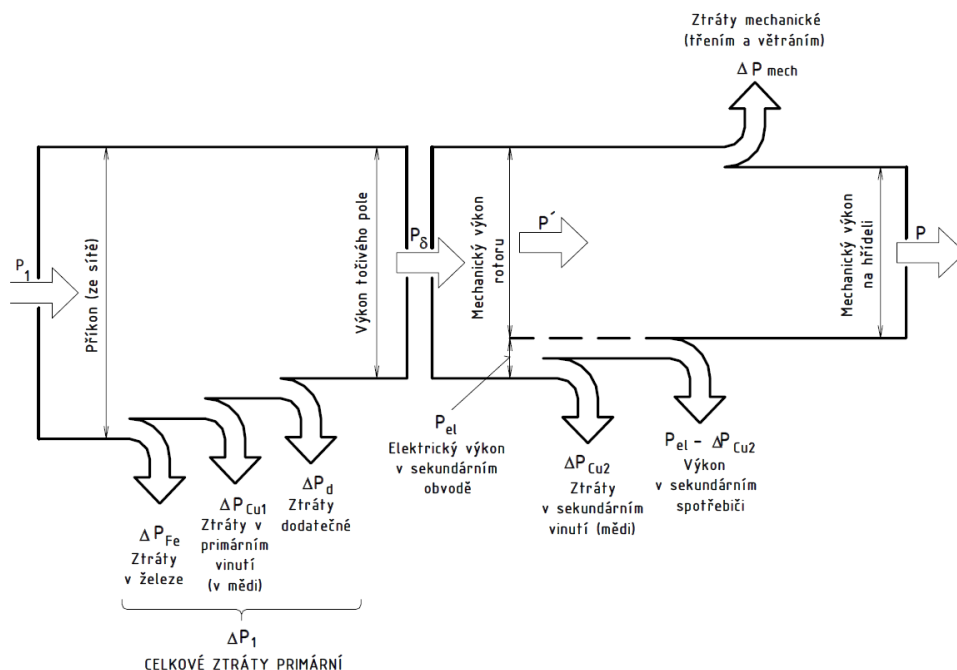
Asynchronní motor odebírá ze sítě příkon o velikosti

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (1.3.1)$$

V případě, že by v asynchronním motoru nevznikaly žádné ztráty, byl by elektrický příkon P_1 roven mechanickému výkonu na hřídeli motoru P_2 . Toho však není možné dosáhnout. Existuje řada ztrát, které vznikají při běhu motoru a lze je rozdělit do 4 základních skupin [2]:

- elektrické ztráty
- mechanické ztráty
- ztráty v železe
- ztráty přídavné

Všechny tyto ztráty snižují celkovou účinnost elektrického motoru a je snahou vznikající ztráty snižovat. Jednotlivé ztráty se dále dělí na ztráty závislé na zatížení a ztráty na zatížení nezávislé.



Obr. 4: Zobrazení ztrát vznikajících v elektrických motorech [1]

Mechanické ztráty vznikají především třením v točících se částech stroje jako jsou ložiska, a také třením o vzduch.

Ztráty třením v kluzných ložiskách závisí na obvodové rychlosti hřídele. Pro stroje s obvodovou rychlostí hřídele $v = 0,5$ až $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ jsou tyto ztráty úměrné $v^{1,5}$ a pro rychlost v nad $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ jsou přímo úměrné rychlosti v . [2] Dále jsou tyto ztráty nepřímo úměrné teplotě hřídele, na jakosti a viskozitě oleje a stavu zaběhání ložisek. Menší měrou tyto ztráty závisí i na velikosti zatížení stroje, avšak především u strojů s řemenovým převodem. Ztráty se určují z měření stroje naprázdno, kdy jsou společně s dalšími ztrátami určeny ztráty třením v ložiskách na řádně zaběhaném stroji s ložisky teplými jako při pravidelném chodu. Ztráty vzniklé třením v kluzných ložiskách se u velkých strojů s oběhem oleje z množství a oteplení oleje jako u převodových skříní dle vzorce

$$\Delta P_{z1} = 2,78 \cdot Q \cdot \delta \cdot c \cdot \Delta \vartheta_1 \cdot 10^{-7} \quad (1.3. 2)$$

Q	průtok teplého oleje v $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
δ	měrná hustota oleje v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
c	měrné teplo oleje, obvykle $1800 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot ^\circ\text{C}$
$\Delta \vartheta_1$	oteplení oleje ve $^\circ\text{C}$

ztráty odvedené povrchem

$$\Delta P_{z2} = S \cdot \Delta \vartheta_2 \alpha \quad (1.3. 3)$$

S	plocha povrchu sálajícího tepla v m^2
$\Delta \vartheta_2$	střední oteplení sálajícího povrchu ve $^\circ\text{C}$
α	měrné ztráty sáláním, přibližně $0,008$ až $0,1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$

Celkové takto vzniklé ztráty jsou součtem obou ztrát

$$\Delta P_z = \Delta P_{z1} + \Delta P_{z2} \quad (1.3. 4)$$

Ztráty třením ve valivých ložiskách bývají obvykle okolo 10 % ztrát v ložiskách kluzných [2]. Tyto ztráty jsou opět závislé na rychlosti otáčení hřídele, není však u nich nutné tolik dbát na ustálení teploty ložisek.

Ztráty třením kartáčů o sběrací kroužky se uplatňují u motorů s vinutým rotorem a sběracími kroužky. Jsou přímo úměrné rychlosti kroužků a lze je považovat za ztráty závislé na zatížení [2].

Poslední ztráty, které patří mezi mechanické, vznikají třením ventilátoru o vzduch a jsou úměrné množství vzduchu a kvadrátu rychlosti vzduchu. Vzhledem k tomu, že je množství vzduchu přímo úměrné rychlosti vzduchu, a ta je přibližně úměrná otáčkám stroje, je možné ventilační ztráty přibližně určit jako [2]

$$\Delta P_{vent} \sim n^3, \quad (1.3. 5)$$

kde n jsou otáčky stroje.

V praxi se jednotlivé mechanické ztráty na jednotlivé druhy nerozdělují. Ztráty třením v ložiskách a ztráty ventilační je možné stanovit měřením mechanických ztrát. Mechanické ztráty stroje jsou při stálých otáčkách a teplotě stroje stálé, nezávislé na zatížení a lze je určit z měření stroje naprázdno [2].

Ztráty v železe vznikají změnou magnetické indukce v aktivních železných částech stroje, tedy plechách statorového a rotorového vinutí. Dělí se na ztráty hysterezní a na ztráty vířivými proudy. Platí pro časově sinusovou magnetizaci v jednom osovém směru. Vyšší harmonické a točivá magnetizace se v praxi zanedbává [2].

Hysterezní ztráty vznikají přemagnetováním železa. Pro dynamové a transformátorové plechy určité jakosti jsou měrné hysterezní ztráty rovny [2]

$$\Delta p_h = c_h \cdot f \cdot \beta^\alpha \quad (1.3. 6)$$

c_h	konstanta
f	frekvence přemagnetování v (Hz)
β	magnetická indukce v (T)
α	mocnitel; pro $B > 1$ až 2,2 T má hodnotu 1,6 a pro $B < 1,5$ T hodnotu 2

Ztráty vířivými proudy pro určité rozměry a jakost materiálu lze vypočítat [2]

$$\Delta p_v = c_v \cdot f^2 \cdot \beta^2 \quad (1.3. 7)$$

c_v	konstanta
f	frekvence v (Hz)
β	magnetická indukce v (T)

Ztráty hysterezní a vířivými proudy vznikají jak ve statoru, tak i v rotoru. Ve statoru jsou ztráty hysterezní ΔP_{Feh1} a vířivými proudy ΔP_{Fev1} , v rotoru hysterezní ΔP_{Feh2} a ztráty vysokofrekvenční ΔP_{Fehf} . Tyto ztráty vznikají v tenké vrstvě povrchu železa ve vzduchové mezeře kolísáním indukce kmitočtem jiným než síťovým a také nedokonalou izolací plechů, případně opracováním povrchu, a to jednak v zubech rotoru a statoru pulzací pole mezi nimi. Těmto ztrátám se říká povrchové a vznikají v klidu, jsou kryty převážně elektricky ze sítě, a jsou úměrné druhé mocnině skluzu jednotlivých harmonických. Druhé, nazývané pulzační ztráty, vznikající za chodu jsou úměrné druhé mocnině otáček n a jsou kryty mechanicky z mechanického momentu rotoru. [2]

Pro daný stroj jsou ztráty v železe stálé při stálých otáčkách, kterým odpovídá stálá frekvence f a na indukovaném napětí, kterému odpovídá stálá magnetická indukce. Rozdíl ztrát v železe naprázdno a při zatížení závisí pouze na rozdílu indukovaného napětí při chodu naprázdno a při zatížení, pokud se otáčky stroje nezmění. Ztráty v železe spolu se ztrátami mechanickými tvoří ztráty naprázdno a jsou tedy nezávislé na zatížení stroje. [2]

Ztráty v železe lze souhrnně určit ze vzorce

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \cdot \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (1.3. 8)$$

Ztráty elektrické jsou ztráty Jouleovy a vznikají u indukčních strojů, mezi které patří i asynchronní motor ve statorových a rotorových vinutích. Tyto ztráty lze vypočítat

$$\Delta P_{el} = R \cdot I^2 \quad (1.3. 9)$$

I	efektivní hodnota střídavého proudu procházejícího vinutím
R	odpor vinutí měřený stejnosměrným proudem a přepočítaný na teplotu 75 °C

Při určování jednotlivých ztrát se ztráty Jouleovy nejlépe určí výpočtem ze změřeného odporu vinutí a ze známého jmenovitého proudu nebo jeho části při částečném zatížení. Takto určené ztráty jsou však nižší než skutečné, neboť prochází-li vinutím střídavý proud, nebo je-li vodič ve střídavém magnetickém poli, vznikají ve vinutí vířivé proudy, které způsobí zvýšení odporu vinutí. Toto zvětšení ztrát se zahrnuje do přídavných ztrát.

Jak bylo uvedeno, ztráty vznikají u indukčních strojů jak ve statoru, tak i v rotoru. Ztráty ve statoru lze vypočítat

$$P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (1.3. 10)$$

kde R_1 je odpor statorového vinutí. Ztráty v rotoru lze spočítat obdobně

$$P_{Cu2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (1.3. 11)$$

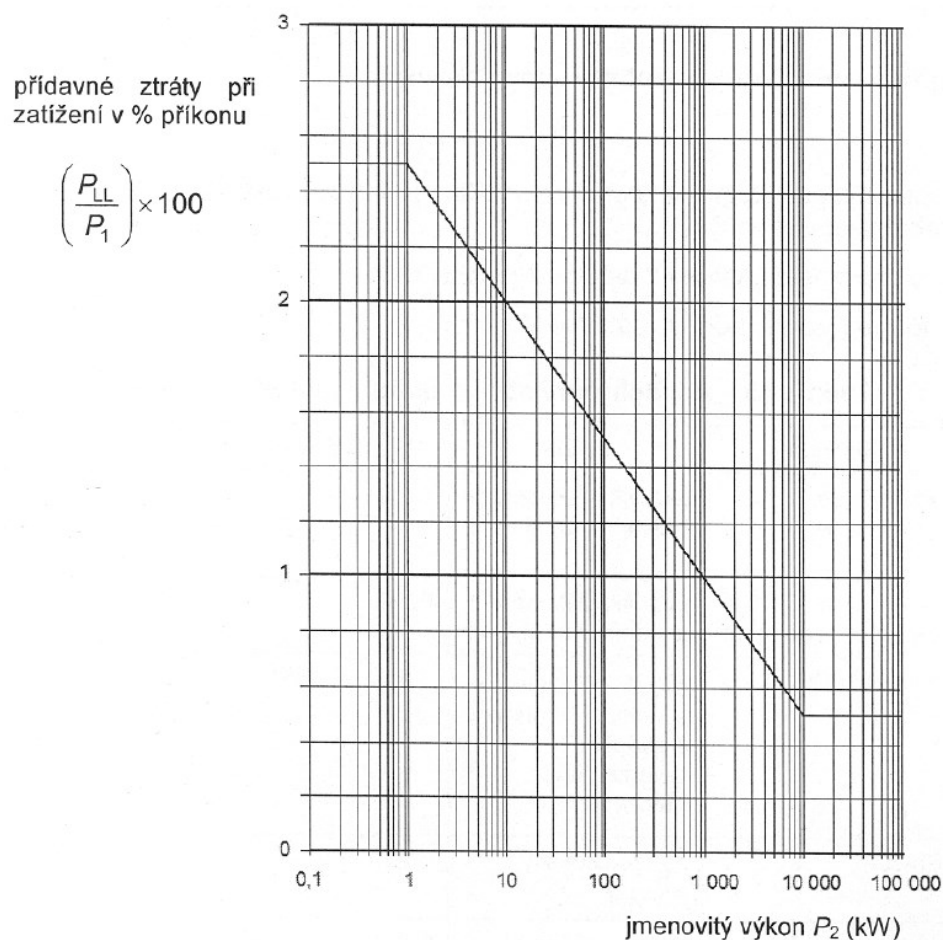
Ztráty elektrické jsou ztráty závislé na zatížení a jejich velikost roste s druhou mocninou procházejícího proudu.

Ztráty přídatné jsou způsobeny vířivými proudy vznikajícími ve vodičích nebo v kovových částech, které jsou v proměnném magnetickém poli. Tyto ztráty zvyšují ztráty ve vinutí i v železe. [2]

Přídavné ztráty ve vinutí vznikají ve vodičích, jimiž prochází střídavý proud. Vířivé proudy se indukují ve vodiči proměnným magnetickým polem proudu procházejícího tímto vodičem zvětšují hustotu proudu na povrchu a tím zvětšují efektivní odpor vinutí při střídavém proudu. Velikost těchto přídatných ztrát závisí na kmitočtu procházejícího proudu a mají vliv na jeho velikost a obsah vyšších harmonických proudů. [2]

Přídavné ztráty v železe pocházejí od vířivých proudů, které vznikají v plných kovových částech střídavými rozptylovými poli jmenovité frekvence. V aktivním železe stroje působí vznik vířivých proudů a přídatných ztrát magnetická pole vyšších harmonických magnetomotorické síly nebo magnetická pole vznikající při nesouměrném zatížení. Do přídatných ztrát v železe se zahrnují také ztráty povrchové, vznikající v zubech pulzací magnetického pole vlivem drážkování. [2]

Přídavné ztráty nelze předem přesně spočítat. U indukčních strojů je také nelze jednoduše určit měřením, a proto se u nich přídatné ztráty vyjadřují v procentech přivedeného výkonu. Toto procento je pro jednotlivé stroje stanoveno odhadem, anebo normou ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 *Točivé elektrické stroje – Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Tato norma definuje velikost přídatných ztrát při zatížení jako procentuální hodnotu z elektrického příkonu. Tyto hodnoty jsou definovány pro stroje od 100 W do 100 MW a pohybují se od 2,5 % z příkonu stroje u malých strojů až po přibližně 0,5 % pro stroje velkých výkonů.



Obr. 5: Velikost přídavných ztrát definována normou ČSN EN 60034-2-1

Všechny uvedené ztráty mají zásadní vliv na účinnost motoru a je cílem tyto ztráty snižovat. Přehled procentuálního rozdělení ztrát pro 4 pólový motor he v tabulce 2.

Tabulka 2: Procentuální rozdělení ztrát 4 pólového motoru [15]

Ztráty	Procentuální velikost ztrát v (%)
Ztráty ve statoru	30 až 50
Ztráty v rotoru	20 až 25
Ztráty v jádře	20 až 25
Přídavné ztráty při zatížení	5 až 15
Ztráty třením a ventilační ztráty	5 až 10

Snížení ztrát a zvýšení účinnosti lze dosáhnout použitím kvalitnějších materiálů, změnou aktivních a mechanických částí motoru. Ztráty vznikající v železe je možné snížit použitím kvalitnějších materiálů pro stavbu magnetického obvodu, případně změnou délky statorového a rotorového svazku. Změnou délky statorového a rotorového svazku se mění indukce ve vzduchové mezeře. Když prodloužíme délku svazku, klesne tím indukce ve vzduchové mezeře a následně se sníží celková síla motoru. Tohoto předpokladu využijeme při snížení ztrát ve statorovém vinutí. Pokud chceme, aby magnetická indukce ve vzduchové mezeře se nezměnila, musíme motor „přisytit“. Na ztráty ve statorovém vinutí má vliv návrh rozměrů drážky a tloušťka izolace. Hlavním cílem je také snížení odporu vodiče, a to buď zvýšením počtu vodičů uložených v drážce, nebo použitím nižší vrstvy izolace. Počet vodičů v drážce je však limitován velikostí drážky a izolace musí plnit svou funkci i při teplotách daných teplotní třídou izolace. Ztráty v rotoru je možné snížit zvětšením průřezu rotorové drážky a zvětšení průřezu kruhů nakrátko. Lze také uvažovat o použití jiného materiálu tyčí v drážce než je hliník, nebo mosaz a nahradit je třeba mědí. Pro snížení přídavných ztrát je možno použít magnetické klíny, dále je třeba mít optimální vzduchovou mezeru a optimální poměr drážek statoru a rotoru. Mechanické ztráty lze eliminovat pouze částečně. Lze je redukovat použitím kvalitních ložisek, těsnění, a zvláště pak optimálním návrhem chladicího ventilátoru. Motor s větší účinností má menší ztráty, proto může mít menší ventilátor, což vede i ke snížení ventilačních ztrát a také hladiny hluku. Významným prvkem pro návrh motoru je velikost vzduchové mezery mezi rotorem a statorem. Větší vzduchová mezera snižuje výrobní náklady. Všeobecně menší vzduchová mezera zlepšuje účinnost a účinník motoru. Extrémní zmenšování rozměrů vzduchové mezery vede dokonce k ještě lepšímu účinníku. Účinnost se ale zmenšuje, a navíc je třeba posoudit vibrace motoru. Všechny tyto uvedené způsoby snižování ztrát je třeba různě kombinovat nejen pro zvýšení účinnosti, ale výrobci asynchronních elektromotorů musí rovněž garantovat i další parametry jako jsou poměrné záběrné momenty, poměrné záběrné proudy, účinník a další.

Snižování ztrát a zvyšování účinnosti je provedeno na úkor zvýšení výrobních nákladů, a tím i jejich pořizovací ceny. Pořizovací cena motoru představuje jen malou část z celkových provozních nákladů, do kterých je nutné zahrnout cenu za spotřebovanou elektrickou energii a náklady na údržbu.

1.4 Měření účinnosti asynchronního motoru

Účinnost motorů se měří na hotovém, správně sestaveném stroji ve zkušebně. Existují dva možné způsoby měření účinnosti, a to přímé měření a měření nepřímé. Způsob měření účinnosti bývá uveden v záručním listu, v případě, že není metoda uvedena, jedná se o měření nepřímé.

Při přímém měření účinnosti musíme určit elektrický a mechanický výkon. Elektrický výkon lze změřit jednoduše a přesně měřicími přístroji. Obtížnější je měření mechanického výkonu, které se provádí různými způsoby. Při nepřímém měření účinnosti se určují příslušné ztráty pro daný příkon motoru. Měření nepřímé lze rozdělit do dvou skupin, a to měření celkových ztrát a na měření jednotlivých ztrát stroje. Nepřímé měření účinnosti obvykle dává přesnější výsledky než měření přímé. Měření přímé taktéž není možné použít u strojů velkého výkonu.

Postup měření účinnosti motoru stanovuje norma ČSN EN 60034-2-1 ed.2 „*Točivé elektrické stroje – Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla*“, která je platná od dubna 2015 a nahradila ČSN 35 0015 „*Elektrické stroje točivé – Metody určování ztrát a účinnosti*“.

Zkoušky jsou řazeny do tří kategorií:

1. měření výkonu na vstupu a výstupu na jednom stroji. Zahrnuje přímé měření elektrického nebo mechanického výkonu přiváděného do stroje a mechanického nebo elektrického výkonu dodávaného strojem
2. elektrické měření na vstupu a výstupu na dvou identických strojích vzájemně mechanicky spojených při rekuperačním zapojení. Provádí se za účelem eliminace měření mechanického výkonu přiváděného do stroje nebo dodávaného strojem.
3. určení skutečných ztrát ve stroji za konkrétních podmínek. Obvykle nejsou určeny celkové ztráty, ale zahrnují určité složky ztrát.

Metody pro určování účinnosti strojů jsou založeny na množství předpokladů, a proto se nedoporučuje, aby se provádělo srovnání mezi hodnotami účinnosti získanými různými metodami, protože se číselné údaje nemusí shodovat.

Měřicí přístroje elektrických veličin musí mít při přímém měření třídu přesnosti 0,2 a v případě nepřímého měření třídu přesnosti 0,5. Celková nejistota měření nesmí přesáhnout 0,2 % z odečtené hodnoty při účinníku 1,0.

Tyto požadavky platí obecně pro všechny točivé elektrické stroje vyjma strojů pro trakční vozidla.

Pro asynchronní motory jsou definovány tři přednostní metody.

Tabulka 3: Tabulka metod měření účinnosti asynchronního motoru dle ČSN EN 60034-2-1 ed. 2

Metoda	Popis	Aplikace	Požadované vybavení
přímé měření: příkon-výkon	Měření točivého momentu	všechny jednofázové stroje	dynamometr pro plné zatížení
součet ztrát: zbytkové ztráty	P_{LL} stanovené ze zbytkových ztrát	trojfázové stroje se jmenovitým výkonem až do 2 MW	Dynamometr pro 1,25 x plné zatížení, nebo zatížení stroje pro 1,25 x plné zatížení s přístrojem pro měření točivého momentu
součet ztrát: přiřazená hodnota	P_{LL} stanovené z přiřazené hodnoty	trojfázové stroje se jmenovitým výkonem vyšším než 2 MW	

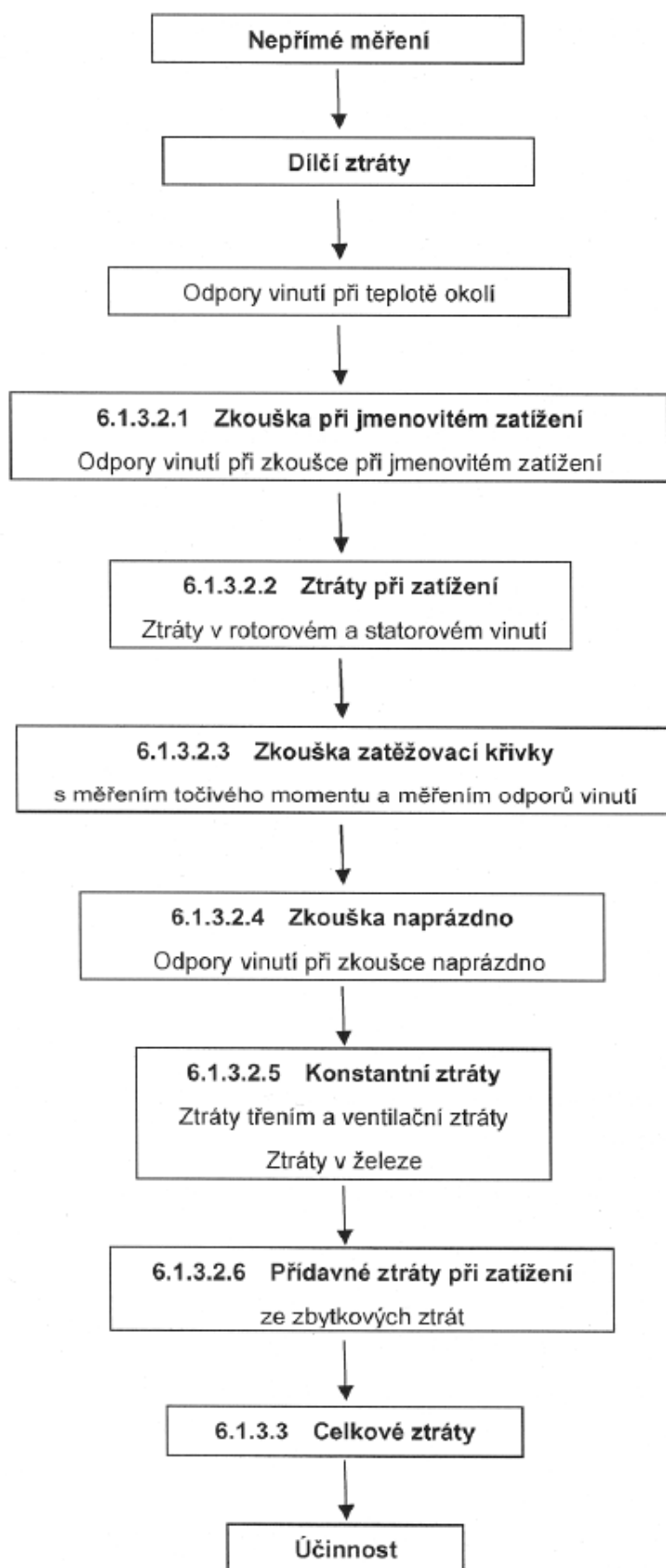
Přímé měření je zkušební metodou, při které je mechanický výkon P_{mech} stroje stanoven měřením točivého momentu na hřídeli, měřením otáček, a zároveň se při stejné zkoušce měří elektrický výkon statoru P_{el} . Zkoušený stroj se spojí se zatěžovacím strojem s měřičem točivého momentu nebo dynamometrem. Zkoušený stroj poté musí pracovat při požadovaném zatížení do dosažení tepelné rovnováhy přičemž se zaznamenává napájecí napětí U , protékající proud I , elektrický příkon P_{el} , otáčky motoru, točivý moment motoru M a vstupní teplota primárního chladiva θ_c .

Druhá měřicí metoda, **součet ztrát, přídavné ztráty při zatížení podle metody zbytkových ztrát** stanovuje účinnost motoru součtem dílčích ztrát.

Jedná se o tyto ztráty:

- ztráty v železe
- ventilační ztráty a ztráty třením
- ztráty v mědi ve statoru a rotoru
- přídavné ztráty při zatížení.

Tato metoda se skládá z posloupnosti jednotlivých zkoušek, které jsou zobrazeny na obrázku 6 a které budou dále popsány.



Obr. 6: Posloupnost zkoušek pro určení účinnosti motoru metodou zbytkových ztrát

Zkouška při jmenovitém zatížení

Při této zkoušce musí být motor zatížen jmenovitým výkonem pomocí vhodných prostředků a provozován až do dosažení tepelné rovnováhy. Před samotnou zkouškou je nutné změřit teplotu a odpor vinutí motoru. Při zkoušce se zaznamenává elektrický příkon P_1 , točivý moment stroje M , svorkové napětí U , síťový proud I , otáčky motoru n , frekvence napájecího napětí f , vstupní teplota primárního chladiva θ_c a teplotu vinutí při jmenovitém zatížení θ .

Ztráty při zatížení

Zkouška pro výpočet ztrát při zatížení se skládá ze zkoušky pro stanovení strát ve satorovém vinutí a zkoušky pro určení ztrát v rotorovém vinutí a následným přepočítáním na referenční teplotu chladiva 25 °C.

Ztráty ve satoru při jmenovitém zatížení jsou

$$P_{Cu2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (1.4. 1)$$

následně přepočítané na referenční teplotu

$$P_{s,\theta} = P_s \cdot k_\theta. \quad (1.4. 2)$$

Ztráty v rotoru se určí z

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s \quad (1.4. 3)$$

kde s je skluz rotoru. I ztráty v rotorovém vinutí je nutné přepočítat na referenční hodnotu teploty

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s_\theta \quad (1.4. 4)$$

Při znalosti ztrát ve satoru a v rotoru je možné určit příkon stroje

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}) \quad (1.4. 5)$$

Zkouška zatěžovací křivky

Zkouška zatěžovací křivky se provádí bezprostředně po zkoušce při jmenovitém zatížení za provozní teploty motoru, případně musí být teplota vinutí maximálně o 5 K nižší než počáteční oteplení θ_n , získané při zkoušce při jmenovitém zatížení.

Měření zatěžovací křivky se provádí v šesti po sobě následujících zátěžných bodech, a to přibližně 125 %, 115 %, 100 %, 75 %, 50 %, 25 % jmenovitého zatížení. Před měřím při nejvyšším zatížení se změří odpor vinutí R a měření se opakuje po ukončení měření při nejnižším zatížení.

Pro zatížení nad 100 % se použije hodnota odporu změřená před měřením nejvyššího zatížení. Pro měření při zatížení menším než 100 % se odpor stanoví z lineární závislosti odporu na zatížení, kdy se pro stanovení použijí obě změřené hodnoty.

Ztráty ve statorovém a rotorovém vinutí se spočítají stejně jako při určování ztrát při zatížení.

Zkouška naprázdno

Zkouška naprázdno se provádí ihned po provedení zkoušky zatěžovací křivky. Před zahájením zkoušky a bezprostředně po ní se určí odpor R_0 .

Tato zkouška se provádí při následujících hodnotách jmenovitého napájecího napětí:

- 110 %, 100 %, 95 %, 90 % jmenovitého napětí a jsou použity pro stanovení ztrát v železe
- 60 %, 50 %, 40 %, 30 % jmenovitého napětí pro stanovení ztrát ventilačních a ztrát třením

Měření musí probíhat co nejrychleji a jsou při něm odečítány hodnoty napětí, proudu a příkonu naprázdno.

Konstantní ztráty

Konstantní ztráty získáme odečtením ztrát naprázdno ve vinutí od příkonu naprázdno, které jsou součtem ztrát vzniklých třením, ventilací a ztrátami v železe. Konstantní ztráty se určují pro každé zatížení podle

$$P_c = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe} \quad (1.4. 6)$$

kde

$$P_s = 1,5 \cdot I^2 \cdot R_{II,0} \quad (1.4. 7)$$

$R_{II,0}$ odpor vinutí pro každý měřicí bod

Ztráty třením a ventilační ztráty

Tyto ztráty se určí z minimálně 4 po sobě následujících bodů ztrát naprázdno měřenými mezi 60 % a 30 % napětí a spojí se tzv. křivkou konstantních ztrát P_c v závislosti na druhé mocnině napětí U_0^2 . Tato přímka se extrapoluje do nulového napětí, kde se určí průsečík při nulovém napětí, který je považován za ztráty třením a ventilačními ztrátami P_{fw0} při přibližně synchronních otáčkách.

Ztráty v železe

Ztráty v železe se určují přibližně mezi 90 % a 110 % jmenovitého napětí, kdy se vytvoří křivka $P_{fe} = P_c - P_{fw}$ v závislosti na napětí U_0 . Pro určení ztrát v železe při plném zatížení je nutné vypočítat vnitřní napětí U_i , které zohledňuje úbytek napětí na odporu primárního vinutí. Vnitřní napětí se pro motor vypočítá

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi\right)^2} \quad (1.4. 8)$$

$$\text{kde } \cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \text{ a } \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (1.4. 9)$$

Přídavné ztráty při zatížení P_{LL}

Zbytkové ztráty

Zbytkové ztráty se určují pro každý zatěžovací bod tak, že se od příkonu odečte výkon, nekorigované ztráty ve statorovém vinutí při dané zkoušce, ztráty v železe, ventilační ztráty a ztráty třením. Nekorigované ztráty v rotorovém vinutí odpovídají určené hodnotě skluzu.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{wf} \quad (1.4. 10)$$

kde

$$P_2 = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n \text{ pro motor} \quad (1.4. 11)$$

a

$$P_{fw} = P_{fw0} \cdot (1 - s)^{2,5} \text{ při } s = 1 - \frac{p \cdot n}{f} \quad (1.4. 12)$$

jsou korigované ztráty třením a ventilační ztráty.

Data zbytkových ztrát se musí za použití lineární regresní analýzy, založené na vyjádření ztrát v závislosti na druhé mocnině zatěžovacího točivého momentu vyhladit.

$$P_{Lr} = A \cdot M^2 + B \quad (1.4. 13)$$

kde A a B jsou konstantami určenými ze šesti zatěžovacích bodů.

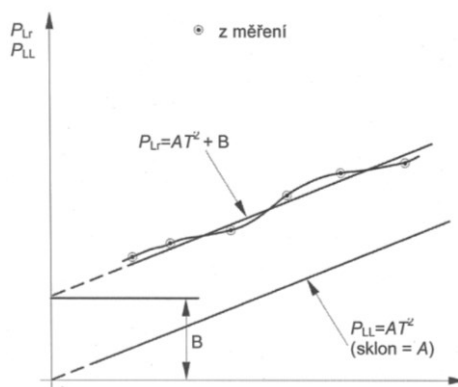
A je sklon

$$A = \frac{i \cdot \sum(P_{Lr} \cdot M^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum M^2}{i \cdot \sum(M^2)^2 - \sum(M^2)^2} \quad (1.4. 14)$$

B je poloha průsečíku

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \cdot \frac{\sum M^2}{i} \quad (1.4. 15)$$

i je počet sečtených zatěžovacích bodů.



Obr. 7: Vyhlažování zbytkových ztrát dle ČSN EN 60034-2-1 ed.2

Následně se vypočítá korelační koeficient

$$\gamma = \frac{i \cdot \sum (P_{Lr} \cdot M^2) - (\sum P_{Lr}) \cdot (\sum M^2)}{\sqrt{(i \cdot \sum (M^2)^2 - (\sum M^2)^2) \cdot (i \cdot \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2)}} \quad (1.4. 16)$$

Takto vypočítaný korelační koeficient nesmí být menší než 0,95. Pokud se tak stane, je nutné vypustit nejhorší bod a provést novou regresi. Pokud bude hodnota korelačního faktoru vyšší než 0,95, použije se druhá regrese. Pokud i tak je korelační koeficient $\gamma < 0,95$, je zkouška neuspokojivá a ukazuje na chybu v přístrojovém vybavení nebo chybu v odečítaných zkušebních hodnotách, případně v obojím. V tomto případě je nutné zkoušku opakovat. Pokud ale bude dostatek zkušebních dat bude korelační faktor pravděpodobně vyšší než 0,98.

Poté, co je zjištěna konstanta sklonu A , určí se přídatné ztráty při zatížení pro každý zatěžovací bod pomocí vzorce

$$P_{LL} = A \cdot M^2 \quad (1.4. 17)$$

Určení účinnosti z celkových ztrát

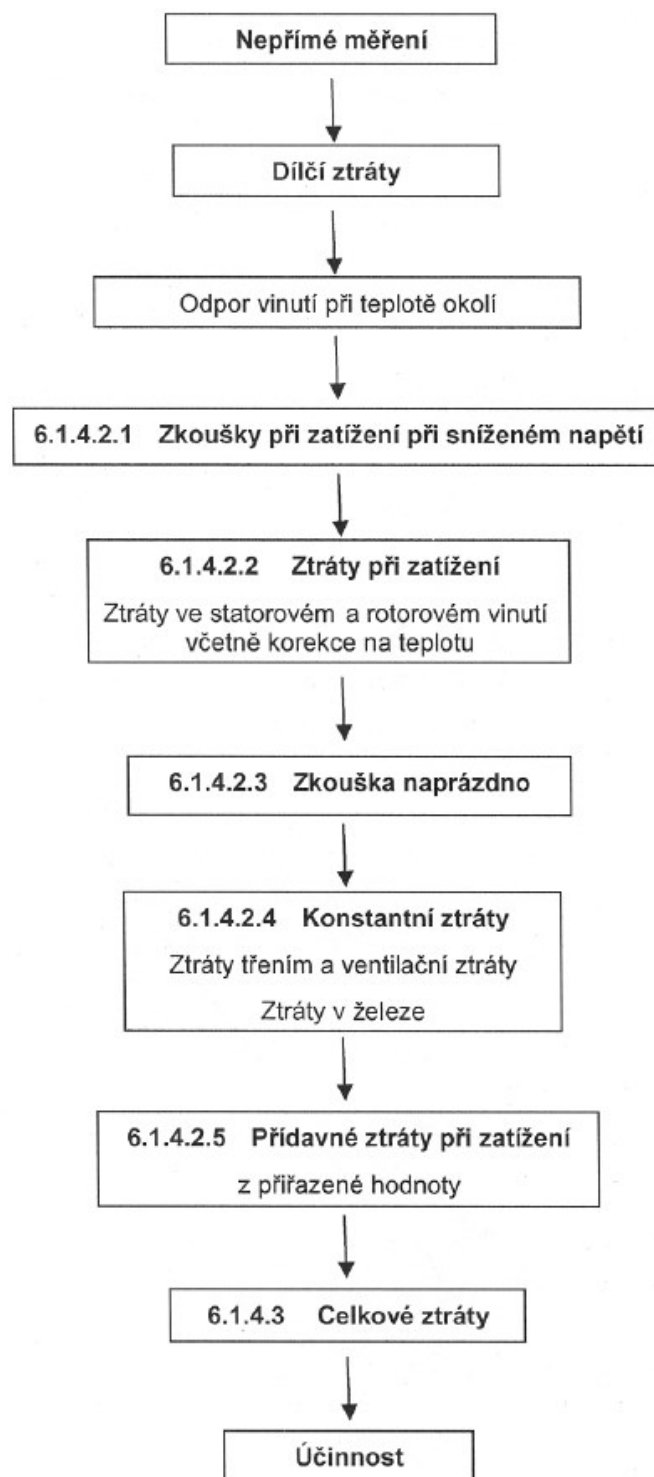
Účinnost motoru se po provedení všech předcházejících zkoušek určí z celkových ztrát, které jsou součtem ztrát v železe, ztrát třením, ventilačních ztrát, ztrát při zatížení a přídavných ztrát při zatížení.

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL} \quad (1.4.18)$$

Účinnost motoru se následně vypočítá z

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_{1,\theta}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad (1.4.19)$$

Poslední metodou pro měření účinnosti asynchronních motorů velkých výkonů je **metoda součtu ztrát s přídavnými ztrátami při zatížení z přirozené tolerance**. Tato metoda je podobná jako metoda přídavných ztrát při zatížení, avšak je na rozdíl od předchozí metody proveditelná i u asynchronních motorů s výkonem nad 2 MW. Tato metoda je založena na zkoušce při zatížení se sníženým napětím a s přirozenou hodnotou pro přídavné ztráty při zatížení. Při této zkoušce se neuplatňuje zkouška při plném zatížení a zkouška zatěžovací křivky.



Obr. 8: Posloupnost zkoušek pro metodu součtu ztrát s přídavnými ztrátami při zatížení z přirozené tolerance dle ČSN EN 60034-2-1 ed. 2

Zkouška při zatížení při sníženém napětí

Zkouška při zatížení při sníženém napětí je metodou používanou u velkých strojů, kde není možné provádět zkoušky při plném zatížení. Tato metoda předpokládá, že při sníženém napětí, za udržení konstantních otáček, klesají proudy s napětím a výkon klesá s druhou mocninou napětí. Při zkoušce se stroj provozuje za použití maximálního dostupného zatížení s napětím sníženým tak, aby se dosáhlo jmenovitých otáček a provozuje se až do dosažení tepelné rovnováhy. Během zkoušky se zaznamenávají redukované napětí U_{red} , proud I_{red} , příkon P_{1red} , proud naprázdno I_{0red} , $\cos\varphi_{red}$. Dále se při jmenovitém napětí, při chodu naprázdno zaznamenává jmenovité napětí U_N , proud naprázdno I_0 a účinník naprázdno $\cos\varphi_0$.

Ze zmeřených hodnot je následně nutné spočítat proud při zatížení a příkon stroje při jmenovitém zatížení.

$$I = I_{red} \frac{U_N}{U_{red}} + \Delta I_0 \quad (1.4. 20)$$

kde

$$\Delta I_0 = -j \left(|I_0| \sin\varphi_0 - |I_{0red}| \frac{U_N}{U_{red}} \sin\varphi_{0red} \right) \quad (1.4. 21)$$

Příkon asynchronního motoru při jmenovitém zatížení je

$$P_1 = P_{1red} \cdot \left(\frac{U_N}{U_{red}} \right)^2 \quad (1.4. 22)$$

Ze stanovených hodnot proudu, příkonu a skluzu měřeného při sníženém napětí se vypočítají ztráty při zatížení, které jsou podobné těm u zkoušky při zatížení jmenovitým napětím.

Logo výrobce					
--------------	--	--	--	--	--

Datum zkoušky:		Číslo protokolu:		Datum vydání:	
----------------	--	------------------	--	---------------	--

Popis motoru							
Jmenovitý výkon	kW		Výrobce				
Jmenovité napětí	V		Číslo modelu				
Jmenovitý proud	A		Výrobní číslo				
Jmenovité otáčky	min ⁻¹		Druh zatížení IEC 60034-1				
Napájecí kmitočet	Hz		Provedení				
Počet fází	–		Třída izolace IEC 60085				
IEC 60034-30-1 (dimenzováno)		kód IE		Maximální teplota okolí		°C	

Výchozí stav motoru			
Odpor vinutí	R_l	Ω	
Teplota vinutí	θ_b	°C	
Teplota okolí	θ_a	°C	

6.1.3.2.1 Zkouška při jmenovitém zatížení			
Odpor vinutí	R_N	Ω	
Teplota vinutí	θ_N	°C	
Teplota okolí	θ_a	°C	

6.1.3.2.3 Zkouška zatěžovací křivky				Odpor vinutí před zkouškou při zatížení			R	Ω	
Jmenovitý výkon		%		125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %
Točivý moment	T	Nm							
Příkon	P_1	W							
Síťový proud	I	A							
Provozní otáčky	n	min ⁻¹							
Svorkové napětí	U	V							
Kmitočet	f	Hz							
Teplota vinutí	θ_w	°C							
				Odpor vinutí po zkoušce při zatížení			R	Ω	

6.1.3.2.4 Zkouška naprázdno				Odpor vinutí před zkouškou naprázdno			R	Ω	
Jmenovité napětí		%	110 % 100 %	95 %	90 %	60 %	50 %	40 %	30 %
Příkon	P_0	W							
Síťový proud	I_0	A							
Svorkové napětí	U_0	V							
Kmitočet	f_0	Hz							
Teplota vinutí	θ_w	°C							
				Odpor vinutí po zkoušce naprázdno			R	Ω	

6.1.3.3 Určení účinnosti									
Korigovaný jmenovitý výkon	$P_{2,0}$	%		125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %
Korigovaný výkon	$P_{2,0}$	W							
Korigovaný skluz	s_0	–							
Korigovaný příkon	$P_{1,0}$	W							
Ztráty v železe	P_{fe}	W							
Korigované ztráty třením a korigované ventilační ztráty	$P_{tw,0}$	W							
Přidavné ztráty při zatížení	P_{LL}	W							
Korigované ztráty ve statoru	$P_{s,0}$	W							
Korigované ztráty v rotoru	$P_{r,0}$	W							
Účinník	$\cos \varphi$	%							
Účinnost	η	%							

Zkoušeno: _____

Schváleno: _____

Obr. 10: Vzor zkušebního protokolu pro určení účinnosti motoru ze zbytkových ztrát

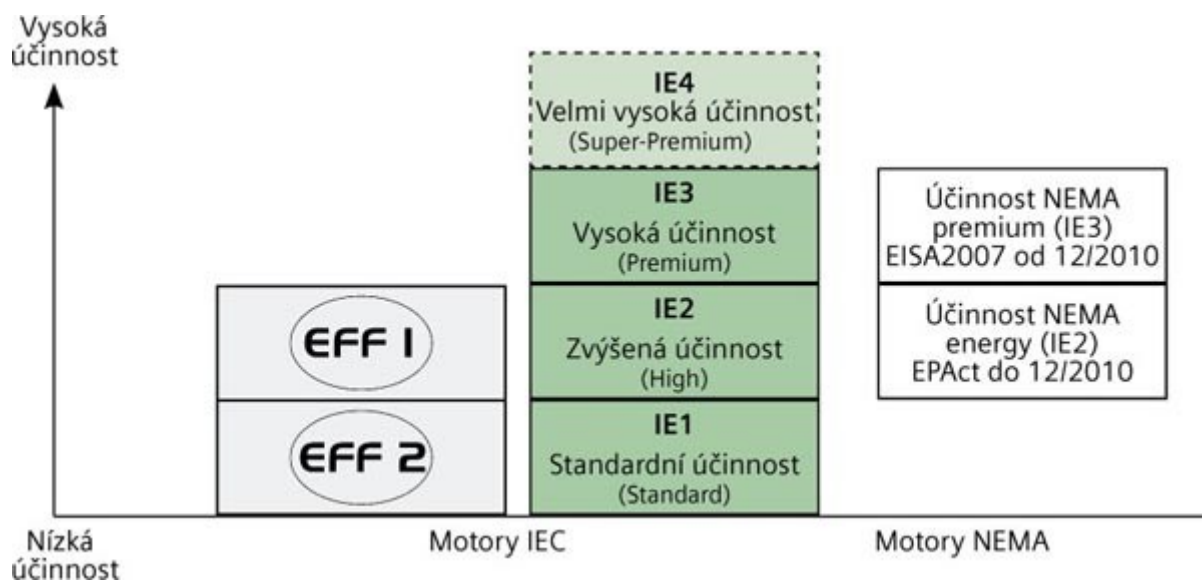
1.5 Třídy účinnosti

Třídy účinností motorů byly v průběhu let označovány různými způsoby podle různých norem a nařízení, které určovali podmínky, které takto označené motory musí splňovat.

Dnes jsou třídy účinnosti motorů dány normou ČSN EN 60034-30-1 „*Točivé elektrické stroje – Část 30-1: Třídy účinnosti střídavých motorů provozovaných ze sítě (IE kód)*“. Tato norma se zabývá všemi druhy elektrických motorů, které jsou dimenzovány pro provoz ze sítě, zahrnuje jednofázové a trojfázové nízkonapěťové asynchronní motory bez ohledu na jmenovité napětí, jmenovitý kmitočet a také motory s permanentními magnety s rozběhem ze sítě výkonu od 0,12 kW do 1000 kW.

U starších motorů, které byly zkoušeny podle dnes již neplatné normy, se lze setkat také s označení třídy účinnosti EFF1, EFF2 a EFF3. Pro nejúčinnější motory se používalo označení EFF1. Jelikož toto rozdělení již bylo nedostatečné, bylo nahrazeno novým značením. Třídy EFF1 a EFF2 jsou svými požadavky na účinnost podobné novým třídám účinnosti IE1 a IE2.

Norma ČSN EN 60034-30-1 definuje celkem 4 úrovně účinnosti motorů, které se značí kódem IE „international efficiency“ a číslem 1 až 4. Norma v budoucím vydání počítá i s definováním třídy účinnosti IE5 avšak podmínky pro použití označení IE5 stále nejsou definovány.



Obr. 11: Znázornění tříd účinnosti motorů [18]

Vzhledem k tomu, že ne všechny technologie výroby motorů umožňují dosáhnout všech tříd účinnosti ve všech velikostech motoru a jejich výroba a provoz by byla ekonomicky neproveditelná, jsou motory rozděleny do tříd energetické účinnosti, které jsou schopné dosáhnout a do tříd, kterých už dosáhnout nedokáží. Technologické možnosti dosažení vyšší účinnosti motoru jsou v tab. 4. Tato tabulka ukazuje, že zvýšení účinnosti motoru a jeho zařazení do vyšší třídy účinnosti je u některých konstrukčních provedení obtížné a co se týče nově plánované třídy účinnosti IE5 je se současnými technologiemi této třídy účinnosti nemožné dosáhnout.

Tabulka 4: Technologické možnosti dosažení jednotlivých tříd účinnosti

Typ motoru		IE1	IE2	IE3	IE4	IE5
Trojfázové asynchronní motory s kotvou nakrátko	vsypávaná vinutí (všechny kryty, všechny jmenovité hodnoty)	ano	ano	ano	obtížné	ne
	tvarovaná vinutí; IP2x (otevřené motory)	ano	ano	obtížné	ne	ne
	tvarovaná vinutí; IP4x a vyšší	ano	ano	ano	obtížné	ne
Trojfázové asynchronní motory s vinutým rotorem		ano	ano	ano	obtížné	ne
Jednofázové asynchronní motory	rozběhový kondenzátor	obtížné	ne	ne	ne	ne
	běhový kondenzátor	ano	obtížné	ne	ne	ne
	rozběhový/běhový kondenzátor	ano	obtížné	ne	ne	ne
	odporová rozběhová fáze	obtížné	ne	ne	ne	ne
Synchronní motory	s permanentním magnetem s rozběhem ze sítě	ano	ano	ano	obtížné	ne

Třída IE1

Třída účinnosti IE1 je nejbenevolentnější třídou účinnosti, kterou tato norma definuje. Jedná se o motory s nejnižší účinností a zahrnuje motory se standardní účinností.

Třída IE2

Tato třída je používána pro motory se zvýšenou účinností. Motory patřící do třídy účinnosti IE2 a vyšší musí být takto trvale označeny na svém štítku.

Třída IE3

Třída IE3 je vyhrazena pro motory s vysokou účinností. Asynchronní motory s touto účinností lze ještě s přiměřeným úsilím vyrábět.

Třída IE4

Třídou IE4 by měli být označovány motory s velmi vysokou účinností. Takto vysoké účinnosti je u některých konstrukčních provedení motoru obtížné dosáhnout, případně této třídy nelze se současnými technologiemi dosáhnout vůbec.

Třída IE5

Třída IE5 je třídou, která bude zavedena v budoucnu. Pro tuto třídu zatím nejsou stanoveny mezní hodnoty účinnosti, avšak předpokládá se, že třída IE5 by měla mít oproti třídě IE4 ztráty nižší přibližně o 20 %.

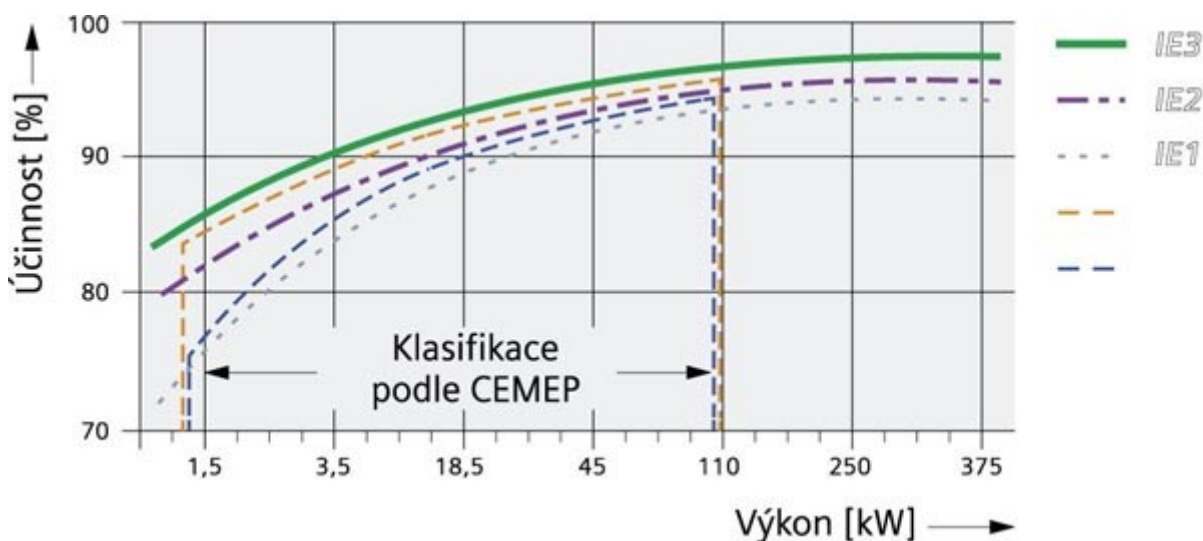
Porovnání mezních hodnot účinnosti 2-pólového stroje o různém výkonu v jednotlivých třídách účinnosti je uvedeno v tabulce 5.

Tab. 5: Mezní hodnoty účinnosti 2-pólového stroje

Výkon motoru (kW)	Mezní hodnoty účinnosti (%)			
	IE1	IE2	IE3	IE4
0,75	72,1	77,4	80,7	83,5
1,5	77,2	81,3	84,2	86,5
3	81,5	84,6	87,1	89,1
5,5	84,7	87,0	89,2	90,9
11	87,6	89,4	91,2	92,6
30	90,7	92,0	93,3	94,5
55	92,1	93,2	94,3	90,9
90	93,0	94,1	95,0	95,8
132	93,5	94,6	95,4	96,2
160	93,8	94,8	95,6	96,3
200	94,0	95,0	95,8	96,5

Z této tabulky je patrné, že se zvyšujícím se výkonem stroje, rostou i požadavky na jeho účinnost. Toto má logické vysvětlení. Větší stroj má větší spotřebu elektrické energie a nízká účinnost by tak znamenala velké ztráty. Stroje nízkého výkonu budou mít sice nižší účinnost, tedy vyšší ztráty, ale energie potřebná na pokrytí těchto ztrát je v porovnání se stroji velkého výkonu nepoměrně menší.

I přesto, že rozdíly v některých třídách účinnosti jsou malé, například několik procentních bodů, můžou však představovat velmi významný pokles ztrát. Zvýšení účinnosti ze 75 % na 78,9 %, z 85 % na 87,6 % nebo z 90 % na 91,8 % představuje pro stejný výkon vždy pokles ztrát o 20 %. [15]



Obr. 12: Závislost účinnosti jednotlivých tříd účinnosti motoru na jmenovitém výkonu [18]

Nelze si nevšimnout, že pro stejné jmenovité výkony platí, že motory s vyššími otáčkami mají obecně, ne však vždy, vyšší účinnost při jmenovitém zatížení než motory s vyšším počtem pólových dvojic s otáčkami nižšími. Toto však neznamená, že by všechna zařízení měla být poháněna vysokootáčkovými motory. Pro zajištění nižších otáček se používají různé převody. Vzniklé přídavné ztráty by mohli snížit celkovou účinnost pohonu jako takového a tato účinnost by následně byla nižší, než u stroje s větším počtem pólových dvojic a nižšími otáčkami.

Motory pracující trvale nebo po velmi dlouho dobu poskytují příležitost pro snížení spotřeby energie. Takovými aplikacemi mohou být například výrobní stroje, ventilátorové motory, čerpadla a další. Existují však i aplikace, kdy se motory používají pouze po velmi krátkou dobu a velmi nízký počet hodin za rok. U takových aplikací by změna účinnosti nevedla k podstatnému snížení nákladů na spotřebovanou energii, jelikož se jedná o velmi malou část celkové energie.

1.6 Legislativa

Zvyšování účinnosti motorů, s čímž úzce souvisí i růst ceny vyrobených motorů, jakožto i zvýšené nároky na konstrukci, použité materiály a výrobní proces by nebylo cílem výrobců motorů, kdyby do těchto opatření nebyly tlačeni legislativou. Vzhledem k tomu, že normy jsou pouze doporučením, musely být přijaty zákony, které by výrobce zavázali zvyšovat účinnost vyráběných motorů.

První opatření, které bylo vydáno Evropskou unií, a které je závazné pro všechny členské státy, bylo nařízení EU 640/2009, směrnici EU 2009/125/ES, díky které v souladu s normou ČSN EN IEC 60034 došlo k zavedení požadavků na účinnost elektromotorů. Dle tohoto nařízení evropské komise motory spotřebovávají 70 % energie spotřebované v průmyslu, přičemž nákladově efektivním zlepšením účinnosti by se dalo uspořit zhruba 20 % až 30 %.

Tato směrnice byla platná pro jednorychlostní třífázové asynchronní motory s kotvou nakrátko na napájecí napětí s frekvencí 50 Hz a 60 Hz s počtem pólů 2 až 6, jmenovitým napětím U_N do 1 kV a jmenovitým výkonem v rozmezí P_n od 0,75 kW do 375 kW s nepřetržitým provozem.

Další opatření byla přijata nařízením komise EU 4/2014, která upravuje i požadavky nařízení EU 640/2009.

Požadavky směrnice:

- od 16. 6. 2011 musí motory vyhovovat minimálně třídě účinnosti IE2
- od 1. 1. 2015 musí motory se jmenovitým výkonem 7,5 kW až 375 kW musí vyhovovat třídě účinnosti IE3, případně třídě IE2, pokud se jedná o pohon s proměnnými otáčkami
- od 1. 1. 2017 musí všechny motory vyhovovat minimálně třídě účinnosti IE3, případně třídě IE2, pokud se jedná o pohon s proměnnými otáčkami.

Dále jsou v této směrnici uvedené hodnoty minimální účinnosti pro jednotlivé třídy účinnosti, stejně jako v normě ČSN EN 60034-30-1.

2 Návrh pracoviště

2.1 Zadání pro pracoviště laboratorní pracoviště

Zadání pro návrh měřicího pracoviště nebylo zprvu přesně definováno. Bylo rozhodnuto, že budou vytvořeny dvě varianty zapojení měřicího pracoviště, ze kterých se jedna následně vybere. Podmínkou návrhu byla možnost napájet motor, kromě ze sítě, i z frekvenčního měniče a snaha využít stávající vybavení katedry. Následně byl zpracován hrubý koncept pracoviště, který byl projednáván a doplněn o možnost napájení motoru z regulovaného zdroje napětí. Z tohoto zadání vznikly dvě finální varianty, jejichž návrhem se bude zabývat druhá část této diplomové práce.

2.2 Laboratorní sestava Langlois

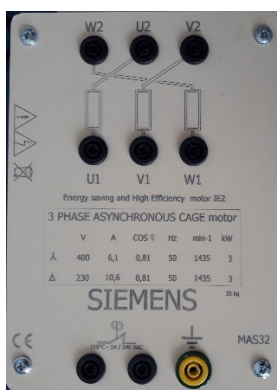
Důvodem tvorby měřicího pracoviště byla možnost využít katedrou elektrotechniky pořízenou laboratorní sestavou Langlois, pro měření na asynchronním motoru. Laboratorní sestava byla dodána francouzskou firmou Langlois, která se specializuje na výrobu a prodej laboratorního vybavení pro školicí střediska a školy zaměřené na elektrotechniku. Sestava se skládá z měřících přístrojů a samotného soustrojí s asynchronním motorem.

2.2.1 Elektromechanická část

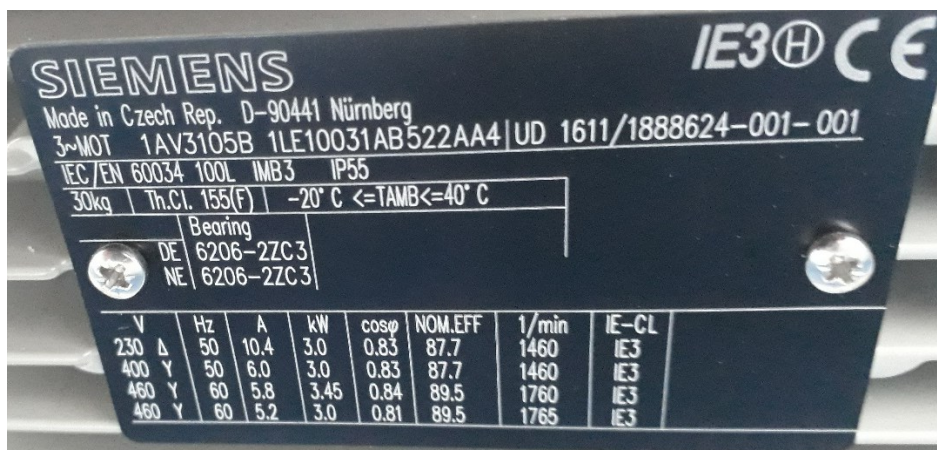
Soustrojí s asynchronním motorem je tvořeno z několika komponent. Funkce a popis parametrů jednotlivých komponent jsou velmi důležité pro další návrh měřicího pracoviště, a proto se jim budu blíže věnovat.

Asynchronní motor

Asynchronní motor je nejdůležitější součástí soustrojí. Právě na tomto motoru se provádí všechna měření. V tomto případě se jedná o asynchronní motor s vlastním chlazením typu 1AV3105B vyrobený firmou Siemens o jmenovitém výkonu 3 kW. Motor má svorkovnici upravenou pro laboratorní měření a má tak vyvedené konce vynutí na svorky.



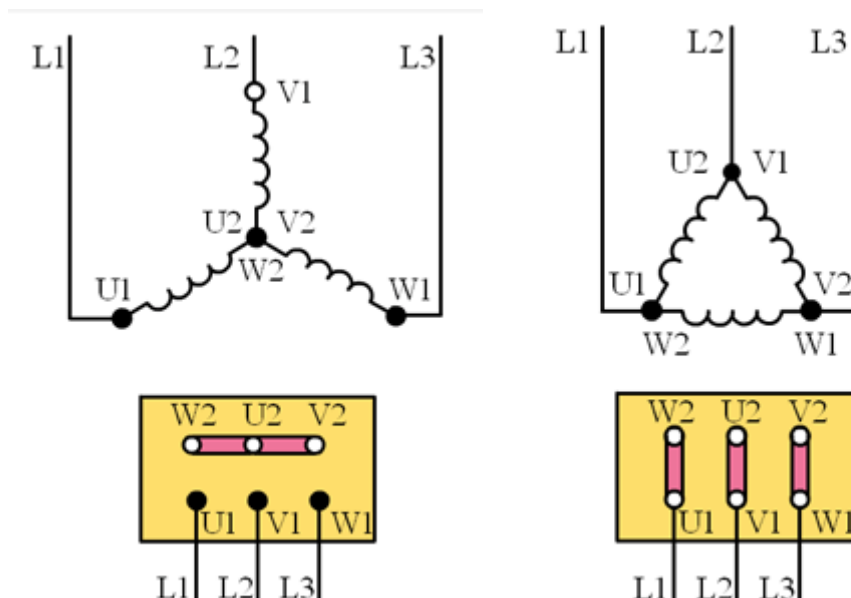
Obr. 13: Svorkovnice motoru



Obr. 14: Výrobní štítek motoru

Na svorkovnici je také vyveden rozpínací tepelný kontakt, který je umístěn ve vinutí a slouží ke zpětné vazbě, že teplota motoru nepřevyšuje 110 °C a nepřevyšuje tak dovolené oteplení dané třídou izolace. Tento kontakt je velmi důležitý, jelikož motor může být provozován při velkém zatížení a snížených otáčkách, což vede ke zhoršenému odvodu tepla a zvyšování teploty motoru. Vzhledem k tomu, že toto pracoviště je mimo jiné určeno k měření účinnosti motoru, je důležitým údajem uvedená třída účinnosti, IE3, kdy se jedná o motor s vysokou účinností a je ho dle nařízení evropské unie možno používat i bez frekvenčního měniče.

Další významnou hodnotou důležitou pro správný návrh měřicího pracoviště je jmenovitá hodnota napájecího napětí v zapojení vinutí do hvězdy a trojúhelníka.

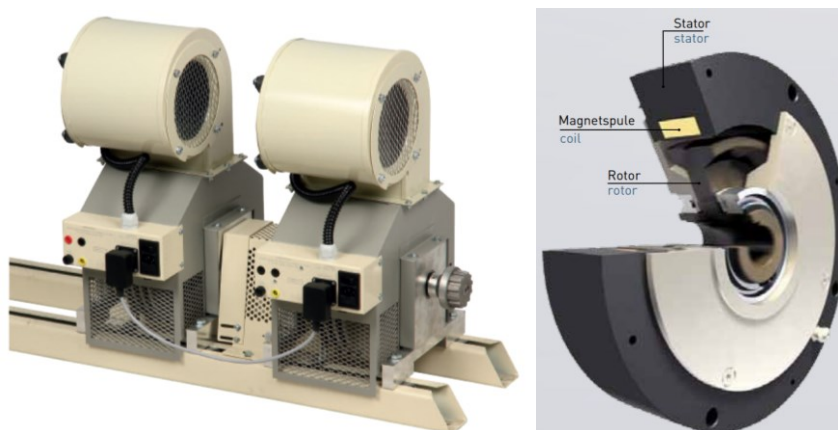


Obr. 15: Zapojení vnutí motoru do hvězdy a trojúhelníku

Ze štítkových hodnot jmenovitého napájecího napětí je zřejmé, že motor lze připojit přímo na síť v zapojení vinutí do hvězdy, kdy se jedná o jmenovité napětí 400 V. V případě, že bychom chtěli motor používat i v zapojení do trojúhelníka, je nutné tomu adekvátně snížit napájecí napětí na 230 V sdružených. V případě, že bychom tedy tento motor připojily přímo na síť, došlo by k neúměrnému napětíovému namáhání vinutí a jeho poškození.

Elektromagnetické práškové brzdy

Aby bylo možné měřit účinnost motoru, je nutné motor zatěžovat. K tomuto účelu slouží dvě elektromagnetické práškové brzdy s celkovým výkonem 70 Nm.



Obr. 16: Elektromagnetické práškové brzdy a její řez

Práškové elektromagnetické brzdy se skládají ze tří základních komponent, cívky, statoru a rotoru. Když je do brzdy přiváděn elektrický proud tak se magnetické pole uvnitř cívky začíná měnit v závislosti na velikosti přiváděného proudu. Změny magnetického pole mění viskozitu speciálního prášku umístěného mezi statorem a rotorem. Když je na cívku přiveden elektrický proud, částice jsou umístěny podél siločar magnetického pole a vytvářejí tažné vazby mezi statorem a rotorem, čímž se vytváří brzdňý účinek. Když je následně proud odpojen, prášek je tlačěn proti statoru odstředivou silou, čímž se rotor uvolní tak, aby se mohl volně otáčet.

Tyto práškové brzdy jsou řízeny stejnosměrným napětím kolem 14 V a generují konstantní brzdňý moment pro všechny rychlosti mezi 0 a 1500 ot/min. Instalované práškové brzdy jsou složeny ze dvou nezávislých jednotek, které jsou vzájemně propojeny hřídelí. Vzájemné monitorování brzd zabraňuje fungování pouze jedné brzdy. Pro regulaci potřebného zatěžovacího momentu je nutné připojit brzdy k regulovanému zdroji, případně, jak je to v tomto případě, k měřicímu přístroji MECASIM, jehož funkce bude popsána dále.

Stejnoseměrné tachodynamo

Pro měření otáček motoru je sestava osazena stejnosměrným tachodynamem. Stejnoseměrné tachodynamo je rotační elektrický stroj, který generuje stejnosměrné napětí. Výstupní hodnota napětí se lineárně mění s otáčkami motoru, a tak je vhodný pro měření otáček. Důležitým parametrem je převod otáček na napětí $10 \text{ V} / 1000 \text{ min}^{-1}$.



Obr. 17: Stejnoseměrné tachodynamo instalované na soustrojí

Snímač točivého momentu

Posledním prvkem soustrojí, který si zaslouží popis je snímač točivého momentu. Snímač momentu snímá moment na hřídeli a převádí ho na elektrické napětí v rozsahu 0 až 5 V.

2.2.3 Měřicí přístroje

Sestavu měřících a vyhodnocovacích přístrojů tvoří přístroje GRANMECA, DIGIWATT, VISIREAL, MECASIM.

GRANMECA

GRANMECA je digitální měřicí přístroj se 3 displeji zobrazujícími otáčky motoru, točivý moment a výkon motoru. K tomuto měřicímu přístroji se pomocí měřících kabelů přivede analogový signál ze stejnosměrného tachodynamu s převodem 10 V/ 1000 min⁻¹ na vstup označený 10 V/ 1000 min⁻¹. Dalším signálem přivedeným do tohoto měřicího přístroje, je signál ze snímače točivého momentu s výstupem 0 – 5 V, který se přivede originálním kabelem. GRANMECA poté vypočítá mechanický výkon podle vzorce

$$P_u = \frac{M \cdot 2\pi \cdot n}{60} \quad (2.2.3.1 \ 1)$$

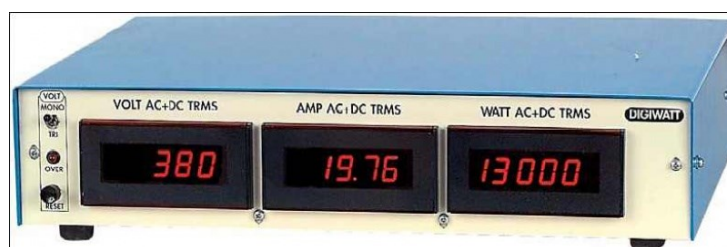
Na předním panelu je umístěn potenciometr kalibrace snímače točivého momentu a také výstup pro řízení zatěžovacího momentu elektromagnetických práškových brzd. [26]



Obr. 18: Měřicí přístroj Langlois GRANMECA

DIGIWATT

DIGIWATT je digitální multimetr s plovoucími vstupy pro měření napětí a proudu. Zobrazuje měřené napětí, proud a příkon. Tento multimetr je určen pro měření napětí souměrné soustavy a proudu symetrické zátěže. S tímto měřicím přístrojem je možné měřit efektivní hodnotu napětí TRMS do 400 V fázového a 700 V sdruženého. Rozsah měřeného proudu je až 20 A, přičemž je tento vstup chráněn proti zkratu a přetížení pojistkou. Na přední části ovládacího panelu je umístěn přepínač měření jedno nebo třífázového napětí a diodou signalizující přepětí na napětíovém vstupu. [26]



Obr. 19: Měřicí přístroj Langlois DIGIWATT

Parametry měřicího přístroje DIGIWATT: [26]

	Napětí (U)	Proud (I)	Příkon (P)
Rozsah	400Vrms fázové 700Vrms sdružené	20 Arms	0,2 – 2 – 20 kW
Přesnost	1 % pro 0 až 70 kHz	2 % pro 0 až 20 kHz 3 % pro 20 až 70 kHz	2 % pro 0 až 20 kHz 3 % pro 20 až 30 kHz 5 % pro 30 až 70 kHz
Ochrana	Ochrana proti přepětí	20 A tavná pojistka	-
Impedance	1,5 MΩ	< 5 mΩ	-
Výstupy	10 VDC / 1000 Vrms	10 VDC / 20 Arms	10 VDC / 0,2 kW – 2kW – 20 kW

MECASIM

MECASIM není měřicím přístrojem. Tento přístroj slouží jako proudový generátor pro ovládání elektromagnetických práškových brzd. Tento přístroj umožňuje simulovat různé typy zatížení jako například:

- konstantní zatížení $T = b$ (např. simulace pásového dopravníku nebo jeřábového motoru)
- točivý moment úměrný rychlosti $T = an + b$ (např. simulace kompresoru a čerpadel)
- točivý moment úměrný druhé mocnině rychlosti $T = an^2 + b$ (např. simulace mixérů, ventilátorů)
- točivý moment nepřímo úměrný rychlosti $T = a / n$ (např. simulace pily a odvíječe)

Pro tyto možnosti simulace je nutné připojit signály ze stejnosměrného tachodynamu a snímače momentu. Na předním panelu jsou umístěny potenciometry a a b , 6 tlačítek pro nastavení charakteristiky zátěže a dva přepínače frekvence a cyklu. [26]



Obr. 20: Langlois MECASIM

VISIREAL

VISIREAL je posledním přístrojem dodaným k laboratorní sestavě. VISIREAL má ke svým vstupním svorkám přivedeny výstupní signály z měřicích přístrojů DIGIWATT a MECASIM umožňující zobrazení měřených hodnot v reálném čase na PC pomocí softwaru a rozhraní s připojením pomocí USB. Tento přístroj je stejně jako všechny předchozí přístroje napájen ze síťové zásuvky 230 V. Software rozhraní VISIREAL bude popsán v části realizace pracoviště. [26]



Obr. 21: Real Time měřicí systém Langlois VISIREAL

2.3 Projektová dokumentace navržených variant měřicího pracoviště

Projektová dokumentace pro návrh pracoviště, výběr komponent a jejich provedení se řídí podmínkami danými normami a vládními nařízeními. Mezi tyto vládní nařízení bezesporu patří Nařízení vlády č. 176/2008 Sb. „*Nařízení vlády o technických požadavcích na strojní zařízení*“ a také jeho změna Nařízení vlády č. 320/2017 Sb. „*Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 176/2008 Sb., o technických požadavcích na strojní zařízení, ve znění dalších předpisů*“.

Projektová dokumentace se skládá z několika částí:

Protokol o určení vnějších vlivů

Před samotným návrhem měřicího pracoviště bylo nutné zhodnotit vnější vlivy, které na zařízení mohou působit dle ČSN EN 33 2000-5-51 ed.3 Z2 „*Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení – Všeobecné předpisy*“. Vzhledem k tomu, že se jednoznačně jedná o prostory normální, lze uplatnit formulaci z národní přílohy této normy.

„Vnější vlivy (nebo jejich části) není nutno určovat v prostorech, pro které jsou tyto vlivy stanoveny jednoznačně technickou normou nebo jiným předpisem. V protokolu o určení vnějších vlivů se u těchto prostorů uvede pouze odkaz na technickou normu nebo příslušný předpis, na jejich základě byly vnější vlivy (zcela nebo z části) stanoveny.“ [16]

„Pokud jednoznačné vnější vlivy u objektů či prostorů, které jsou ve smyslu této normy považovány za normální, není nutno tento protokol vypracovávat.“ [16]

Výkresová dokumentace

Výkresovou dokumentaci tvoří soubor dokumentů sloužících k samotnému provedení díla. V elektrotechnické praxi se jedná o dokumenty obsahující specifikaci materiálu, schéma zapojení, uspořádání skříně, seznam a zapojení kabelů a schéma svorkovnic. Výkresová dokumentace může také obsahovat katalogové listy jednotlivých přístrojů, případně ověření ztrátového tepla výpočtem a případně další dokumenty nutné k provozu zařízení. K provozování elektrického zařízení je nutná výchozí revize zařízení revizním technikem dle §9 vyhlášky 50/1978 Sb. Dále je nutné rozvaděč nízkého napětí podrobit typové zkoušce u autorizované osoby.

Výkresová dokumentace byla zpracována v projekčním softwaru Eplan Electric a jeho nástavbě Eplan ProPanel, se kterými jsem se seznámil v rámci praxe.

Technická zpráva

Technická zpráva je dalším dokumentem projektové dokumentace. Technická zpráva obvykle obsahuje základní údaje o zařízení, výpis norem, podle kterých je zařízení vyrobeno, technické parametry zařízení a provozní a bezpečnostní podmínky. Technická zpráva pro navrhované pracoviště je součástí příloh práce.

Návod k obsluze

Návod k obsluze je nedílnou součástí projektové dokumentace. Návod k obsluze přesně popisuje jednotlivé kroky k uvedení zařízení do provozu jakožto k jeho bezpečné obsluze.

2.3.1 První navržená varianta měřicího pracoviště

První varianta byla koncipována jako varianta s klasickým reléovým řízením. Reléové řízení bylo v minulosti jedinou možností, jak automatizovaně řídit procesy, a proto bude použito v první variantě řízení pracoviště.

Jako první bylo nutné vyřešit napájení celého rozvaděče. Nejschůdnějším řešením bylo využití stávající 5 pólové zásuvky s předřazeným jištěním 32 A, z čehož plyne i dimenzování jednotlivých přístrojů. Jelikož je vhodné dodržet selektivitu mezi jednotlivými ochrannými přístroji, aby nedocházelo k vybavení jističů v nadřazeném rozvaděči, jsou zde použity jističe s nižším jmenovitým proudem, vyjma hlavního jističe, který je taktéž hodnoty 32 A. Kabel použitý pro napájení musí být dimenzován na jmenovitý proud hlavního jističe a musí zohlednit potřebný počet žil dle napájecí sítě TN-S, a proto je navržen flexibilní kabel 5G4. Tento kabel je přiveden na přívodní svorky označené nápisem „*Pod napětím i při vypnutém hlavním vypínači*“ z nichž je dále veden přes hlavní vypínač na hlavní jistič rozvaděče. Vzhledem k požadavkům normy ČSN EN 33 2000-4-41 ed.3 „*Elektrické instalace nízkého napětí – Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti – Ochrana před úrazem elektrickým proudem*“ je nutná doplňková ochrana pomocí proudových chráničů s reziduálním proudem 30 mA pro všechny zásuvky, jejichž jmenovitý proud nepřekračuje 32 A, které mohou být používány laicky a jsou určeny pro obecné použití. Instalace nového proudového chrániče do rozvaděče by byla zbytečnou investicí, jelikož zásuvka, ze které bude rozvaděč napájen je proudovým chráničem již chráněna. Ostatní ochrany použité v projektové dokumentaci zohledňují požadavky na ochranná opatření a jsou provedeny:

- Automatickým odpojením od zdroje
- Dvojitou nebo zesílenou izolací
- Malým napětím PELV

Z navrhovaného rozvaděče budou napájeny všechny potřebné měřicí přístroje dodané firmou Langois, dále jsou na rozvaděči umístěny rezervní zásuvky například pro napájení počítače na vyhodnocení naměřených dat, ale také 3 fázové zásuvky s jištěním 16 A jističem pro napájení dalších zařízení. Jedním z těchto zařízení je regulovaný 3 fázový zdroj a dále také druhé pracoviště, které bude v učebně instalováno.

Pro napájení ovládací části si bylo možné vybrat, zda bude provedeno střídavým napětím 230 V napojeného z oddělovacího transformátoru, nebo zda bude použitý napájecí zdroj s výstupním napětím 24 V stejnosměrných. Vybral jsem si druhou variantu pro nespornou výhodu možnosti použití komponent, kterých je v této napěťové hladině vyráběno nepřeberné množství, a také nižší cenu oproti přístrojům na 230 V střídavých. Použitý napájecí zdroj s výstupním napětím 24 V DC je pro svou vysokou účinnost a možnost přizemnění záporného pólu výstupu zdroje pro získání napájecí soustavy 2/24V/PELV. Výstup zdroje je proti přetížení chráněn jističem, který zároveň slouží k ochraně zařízení připojených za zdrojem.

Ze zadání pracoviště plyne podmínka možnosti přepínání napájení motoru ze sítě, regulovaného 3 fázového zdroje, nebo frekvenčního měniče. Pro napájení z regulovaného 3 fázového zdroje bylo nutné vyřešit bezpečné a rychlé připojení. Rozvaděč byl pro tuto variantu napájení osazen přívodkou, přes kterou se regulovaný zdroj připojí pomocí zástrčky již instalované na zdroji. Zdroj se napájí z jedné z dvojice instalovaných zásuvek. Připojení frekvenčního měniče takto jednoduše provést, s ohledem na

elektromagnetické rušení, nelze. Pro připojení byl použit konektor od firmy HARTING, ke kterému lze celkem jednoduše připojit stíněné kabely a s ohledem na velké množství napojení konektoru je frekvenční měnič skrze tento konektor napájen. Přes konektor jsou do digitálních vstupů měniče připojeny signály pro spuštění a vypnutí měniče. S ohledem na cenu byla vybrána plastová varianta konektoru.

Výběr napájení motoru se provádí 3 polohovým otočným přepínačem, kdy po volbě je přivedeno DC napětí na cívku stykače a dojde k jeho sepnutí.

Přepínání zapojení vinutí motoru do hvězdy a trojúhelníka je provedeno tlačítkovou volbou taktéž pomocí stykačů. Jelikož je motor nutné chránit proti zkratu a přetížení, je jako ochranné zařízení použit motorový spouštěč, přes který prochází napájecí napětí ze sítě nebo 3 fázového regulovaného zdroje. Vzhledem k tomu, že se výstup frekvenčního měniče obvykle nejistí, protože frekvenční měniče mají možnost omezení proudu na výstupu, je přívod z frekvenčního měniče napojen až za motorový spouštěč. Nastavení motorového spouštěče se provede na proud motoru v zapojení do trojúhelníka.

Výběr zapojení vinutí motoru do hvězdy a trojúhelníka je pro napájení motoru ze sítě omezeno pouze na variantu zapojení motoru do hvězdy, kdy by po připojení motoru do hvězdy došlo k poškození vinutí motoru. Tato blokace je zajištěna rozpínacím kontaktem selektoru napájení v ovládací části spouštění motoru do trojúhelníka. Blokace není aplikována v dalších možnostech napájení a je proto nutné dbát na správnost nastavení velikosti napětí.

Napojení motoru je dále provedeno přes svorky umístěné v rozvaděči dvěma stíněnými kabely až na svorkovnici motoru. Dále je na svorky přiveden i rozpínací tepelný kontakt, vedený přes oddělovací relé do ovládací části. Přímé připojení tohoto kontaktu do ovládací části není doporučeno, protože v případě poruchy izolace vinutí motoru může dojít k přivedení svorkového napětí motoru do ovládací části a k jejímu poškození.

Výběr barvy ovládacích a signalizačních prvků je proveden v souladu s normou ČSN EN 60073 ed. 2: „*Základní a bezpečnostní zásady pro rozhraní člověk – stroj, značení a identifikace – Zásady kódování sdělovačů a ovládačů*“. Pro zapínací ovladače je použita barva bílá, pro vypínací ovladače barva černá a pro signalizaci stavu zařízení signálka bílé barvy.

Označení jednotlivých přístrojů je provedeno dle normy ČSN EN 81346-2: „*Průmyslové systémy, instalace a zařízení a průmyslové produkty – Zásady strukturování a referenční označování – Část 2: Třídění předmětů a kódy tříd*“.

Napájení elektromagnetických práškových brzd je taktéž provedeno z tohoto rozvaděče kabelovými vývody s patřičným konektorem na straně brzd. K tomuto řešení jsem se uchýlil kvůli kontrole zapnutí ventilátorů brzd, které je dle doporučení výrobce nutné provést přibližně 2 minuty před jejich použitím a následně také 2 minuty po jejich použití. Ventilátory brzd se zapínají stiskem tlačítka na umístěného na dveřích rozvaděče, čímž dojde k sepnutí ministrykačů. Aby stykače zůstaly v sepnutém stavu a neodpadli ihned po rozepnutí kontaktů tlačítka, jsou k zapínacímu tlačítku paralelně připojeny pomocné kontakty ministrykačů, což zaručí takzvané samodržení. K vypnutí brzd je použito černé tlačítko s rozpínacím kontaktem připojené do ovládací části, po jehož stisku dojde k přerušení napájení ovládací části brzd.

Zapnutím brzd dojde také k aktivaci relé s časovým zpožděním nastavené právě na 2 minuty. Po dobu trvání časového intervalu je ovládání motoru zablokováno. Po uplynutí časového intervalu se rozsvítí signálka, která upozorňuje na možnost zapnutí motoru. Princip funkce časového relé je velmi jednoduchý. Časové relé má na svou cívku trvale přivedené napětí a sepnutí kontaktů probíhá až po uplynutí nastaveného časového intervalu, který je zahájen impulzem na inicializační vstup relé s časovým zpožděním zapnutí. Relé s časově zpožděným vypnutím pracuje na stejném principu, avšak po inicializaci řídicího vstupu je po nastavenou dobu výstup stále v sepnutém stavu. Ovládání brzdného momentu probíhá stejnosměrným napětím na řídicí vstupy brzd přiváděného z přístroje MECASIM.

Samotné zapnutí motoru je podmíněno několika faktory:

- Tlačítko nouzového zastavení se nachází v pracovní poloze
- Uplynutím časového intervalu po spuštění brzd
- Teplota motoru je v dovozeném rozsahu, signalizováno tepelným kontaktem motoru
- Jističe a stykače ventilátorů brzd jsou provozním stavu
- Není stisknuto tlačítko vypnutí motoru

Pokud jsou splněny všechny tyto podmínky je povoleno spuštění motoru. V případě výběru zapnutí motoru do hvězdy je po stisku příslušného tlačítka sepnut hlavní stykač motoru a zároveň taktéž stykač spojující konce vinutí do hvězdy. Hlavní stykač motoru musí být dimenzován na jmenovitý proud motoru, jelikož je motor určen na trvalé provozování v zapojení do hvězdy, je to právě jmenovitý proud motoru v zapojení do hvězdy. Vzhledem k tomu, že se jedná o měřicí pracoviště a motor může být přetěžován jsou stykače předdimenzovány a slouží tak jako jakýsi bezpečnostní prvek. V případě delšího přetěžování motoru by totiž mohlo dojít ke slepení kontaktů stykače a v případě nutnosti odpojení napájení motoru tlačítkem nouzového zastavení, by k rozepnutí stykače nemuselo dojít, což se u předdimenzovaného stykače stát nemůže. Zapnutí motoru v zapojení vinutí do hvězdy je provedeno pomocí hlavní stykače a stykače spojujícího vinutí do trojúhelníka. Stiskem zapínacího tlačítka motoru pro zapnutí do trojúhelníka dojde v případě motoru spuštěného do hvězdy k jeho vypnutí, a následnému odpočtu časového intervalu, zajištěném časovým relé se zpožděním zapnutí nastaveným na 30 sekund, během kterých je volbu možné zrušit. Zde je nutné upozornit, že se nejedná o klasický rozběh hvězda – trojúhelník s ohledem na napájecí napětí motoru. Časový interval zde slouží jako jako bezpečnostní prvek pro ochranu před připojením napájecího napětí, které by mohlo vážně poškodit vinutí. Volba zapnutí do trojúhelníka je standardně blokována pro napájení ze sítě.

Rozvaděč, jakožto i konstrukci pracoviště a taktéž laboratorní sestavu opatřit ochranným pospojováním provedeným v souladu s normou ČSN 33 2000-5-54 ed.3 Z1 Opr. 1 „*Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5-54: Výběr a stavba elektrických zařízení – Uzemnění a ochranné vodiče*“. Ochranné vodiče musí být mechanicky chráněny proti mechanickému poškození, chemickým nebo elektrochemickým rozrušováním a před elektrodynamickými a termodynamickými silami. Pro ochranné pospojování musí být použit vodič s průřezem minimálně 6 mm² pro měděné vodiče. Vzhledem k tomu, že přívodní kabel minimální průřez 6 mm² nesplňuje, nelze jej proto použít pro spojení s ochranou přípojnicí a pracoviště musí být připojeno k zemnicímu bodu budovy, případně k ochranné přípojnici.

Výkresová dokumentace první varianty tvoří přílohu A této práce.

2.3.2 Druhá navržená varianta měřicího pracoviště

Jelikož první navržená varianta byla řízena pomocí reléové logiky, která je v dnešní době hojně nahrazována programovatelnými logickými kontroléry (PLC), je druhá varianta řízena pomocí nejjednoduššího a také nejlevnějšího PLC firmy Siemens řady LOGO!.

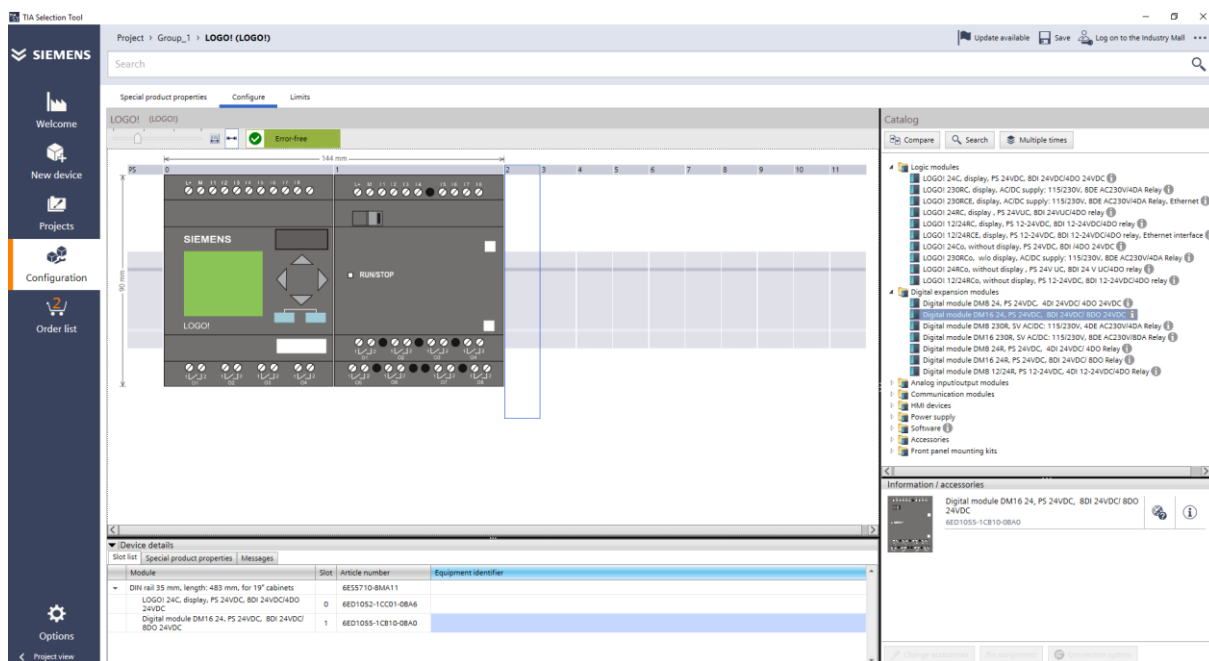
Obě navržené varianty mají mnoho řešení společných. Prvním společným řešením je totožné provedení přívodního vedení, které se liší pouze použitím jiného hlavního vypínače. Pro variantu s řídicím systémem LOGO! je použit odpínač pro nouzové zastavení s červenou ovládací rukojetí na žlutém reflexním pozadí. Tento vypínač se používá i k nouzovému vypnutí rozvaděče. V tomto případě nelze pro odpojení napájení od připojených zařízení použít červené hříbové tlačítko, jelikož LOGO! neobsahuje žádné bezpečnostní funkce, a tudíž není zaručeno, že by byl pokyn k zastavení proveden. Po vypnutí vypínače dojde k odpojení napájení celého rozvaděče, samozřejmě mimo přívodní svorky vypínače a přívodní svorky rozvaděče. Při práci na těchto částech rozvaděče je nutné vytáhnout zástrčku napájecího kabelu ze zásuvky. Popsané části se opatřují upozorněním.

Napájení ovládací části bylo možné volit z mnoha možností. Firma Siemens vyrábí LOGO! v provedení 230 V AC, 24 V DC a 12 V DC. Aby však bylo možné porovnat řešení ovládání pomocí reléové logiky, která byla napájena právě 24 V DC, je zvoleno opět napájení ovládací části soustavou 2/24V DC/PELV.

Výběr zdroje napájení motoru, jakožto i jeho provedení, je totožné s předchozí variantou. Změnou oproti prvnímu řešení je zavedení signálů z otočeného přepínače do digitálních vstupů PLC a následné spínání stykačů z digitálních výstupů. Zavedení signálů z otočného přepínače do digitálních vstupů bylo logickým krokem, protože informace o zvoleném napájení je pro další řízení velmi důležitá. Navíc si lze v programu nastavit i časově posunuté spínání jednotlivých stykačů výběru napájení. O tomto však bude více sděleno v další části práce.

Zapojení silové části motoru nebylo nutno oproti předchozí variantě nijak měnit. Hlavní rozdíly jsou v provedení ovládací části. Toto platí i pro ovládání ventilátorů elektromagnetických brzd.

Jak již bylo uvedeno výše, je tato varianta ovládána programovatelným logickým modulem LOGO!. Výběr vhodného modulu není příliš složitý, ale je lepší využít konfigurační software výrobce TIA Selection Tool, který obsahuje aktuální nabídku a provede kontrolu konfigurace.

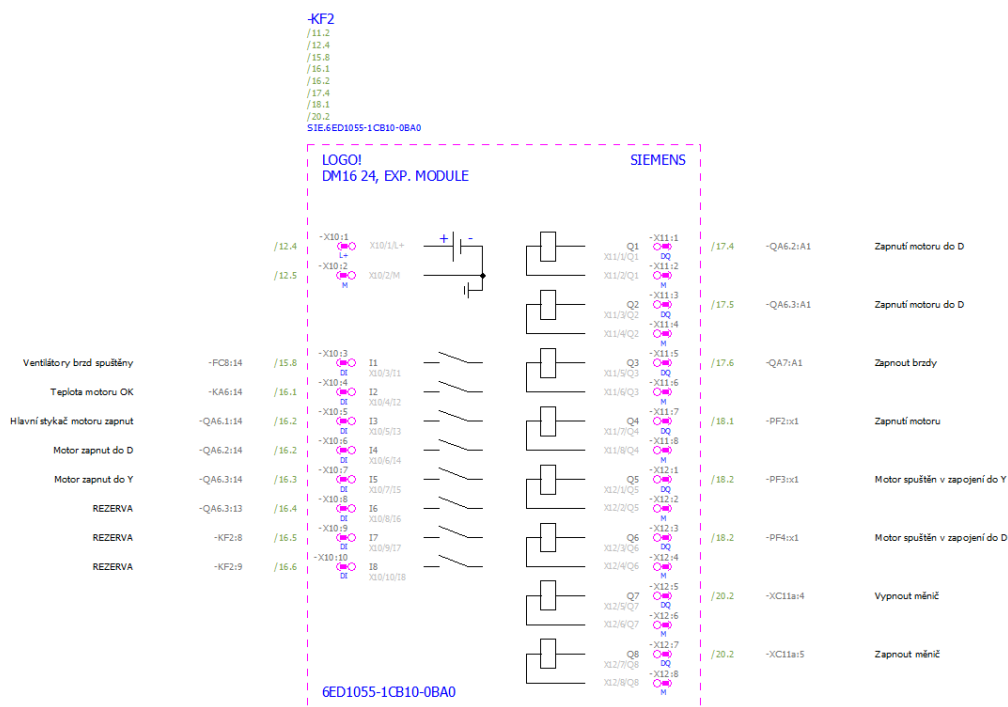


Obr. 22: Konfigurator TIA Selection tool

Pro správný výběr PLC je důležité znát požadovaný počet vstupů a výstupů a jejich provedení. Ovládání měřicího pracoviště není nijak náročné na výpočetní výkon a také s ohledem na cenu byl vybrán starší model. Vybral jsem tedy logický modul s displejem, 8 digitálními vstupy na 24 V DC a 4 tranzistorovými výstupy, které je možné zatížit proudem až 0,3 A. Samotný logický modul však neobsahoval potřebný počet vstupů a výstupů, a proto musel být přidán rozšiřující modul s 8 digitálními vstupy a 8 tranzistorovými výstupy. Starší řada oproti nové řadě LOGO! 8 má paměť omezenou na 250 bloků, nemá komunikační ani programovací rozhraní, ani slot na paměťovou kartu. Pro tuto aplikaci je LOGO! více než dostatečné, jelikož program s jistotou nepřesáhne velikost 250 bloků.

Digitální vstupy jsou plně obsazeny signály z ovládacích tlačítek umístěných na dveřích rozvaděče a zpětných vazeb přístrojů potřebných k řízení. Z digitálních výstupů jsou napojeny ovládací cívky stykačů. Výběr vhodných stykačů nekončí pouze proudovou zatížitelností hlavních silových kontaktů ale také velikostí řídicího napětí, samotnou spotřebou cívky stykače a také počtem pomocných kontaktů. Pro tuto variantu byly vybrány stykače výrobce Schneider Electric série Tesys D s cívkou řídicího obvodu se sníženou spotřebou na 2,4 W, což je přibližně polovina obvyklé spotřeby stykačů této velikosti, a vestavěnou obousměrnou omezující odrušovací diodou.

Výhodou projekčního softwaru Eplan Electric, oproti klasickému kreslení zapojení na papír, případně v některém z dostupných CAD systémů je vytvoření specifikace materiálu, kterou jde exportovat například do tabulkového procesoru, například Microsoft Excel. Specifikace materiálu je tvořena ze všech použitých prvků v zapojení, které jsou součástí databáze artiklů. Další nespornou výhodou a pomocí pro projektanta je kontrola použití jednotlivých přístrojů a jejich součástí v projektu, takže se nemůže stát, že by byl použit například jeden kontakt stykače v zapojení dvakrát. PLC přehled vytvořený ve výkresové dokumentaci urychluje orientaci ve schématu při programování PLC.



Obr. 23: PLC přehled rozšiřujícího modulu

Výkresová dokumentace druhé varianty tvoří přílohu **B** této práce.

2.3.3 Návrh provedení rozvaděčové skříně

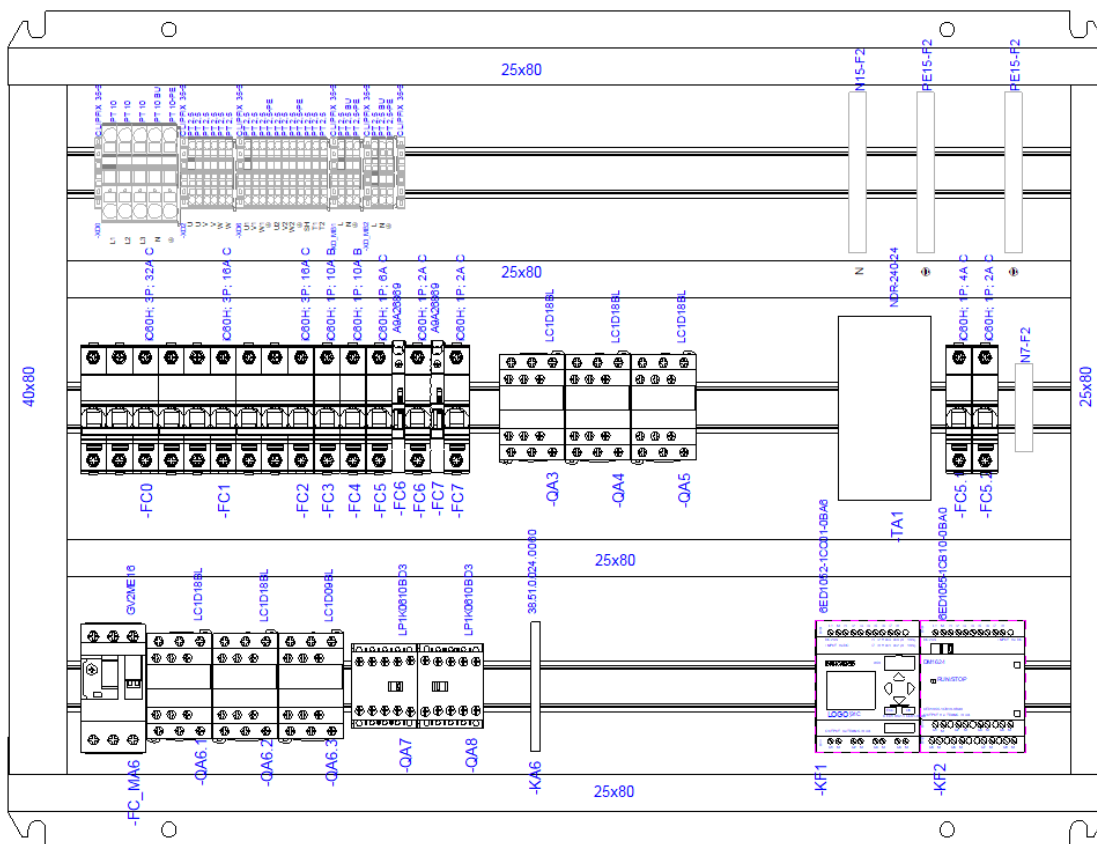
Výběr velikosti, výrobce a typu skříně může být dán několika faktory:

- požadavky upřednostňující jednoho výrobce a jeden typ nehledě na přístrojovou náplň rozvaděče
- velikostí okolního prostoru
- přístrojovou náplní rozvaděče
- odvodem ztrátového tepla povrchem v místech, kde s ohledem na vnější vlivy není možné instalovat chlazení

Výběr rozvaděče pracoviště pro měření účinnosti asynchronního motoru byl proveden pouze s ohledem na přístrojovou náplň rozvaděče. Jelikož nebyl požadavek na výběr konkrétního výrobce ani konkrétní typ, rozhodl jsem se pro kompaktní rozvaděčovou skříň světoznámého výrobce Rittal. Jedná se o standardní skříň o rozměru 800 x 600 x 300 mm, s krytím IP66 ve standardním odstínu RAL7035.

Součástí obou návrhů rozvaděče měřícího pracoviště, ze kterých se vybírala varianta, která se bude realizovat, bylo i rozvržení přístrojů v rozvaděči. Samotný návrh respektoval požadavek umístění do navrhované konstrukce pracoviště. Návrh skříně bylo možné provést v některém z CAD programů, ale já jsem si vybral nástavbu projekčního softwaru Eplan Electric Eplan ProPanel. Eplan ProPanel je nástavba Eplanu úzce svázaná se schématem zapojení a databází artiklů. Slouží ke konstrukci rozvaděče ve 3D zobrazení. Díky provázanosti se schématem zapojení, je možné použít a do montážní plochy umístit pouze přístroje v projektu použité a díky 3D modelům, případně bloků tvořených skutečnými rozměry přístroje definovanými v databázi artiklů, nemůže dojít ke kolizi dvou přístrojů. V případě použití některého z CAD programů je nutné dodatečně zjišťovat rozměry všech použitých prvků, jakožto i rozměrů a uspořádání samotné skříně. Zobrazení rozvaděče ve 3D jsem využil pro konstrukci

rozvaděče abych těmto kolizím zabránil a mohl efektivně využít celou plochu montážní desky rozvaděče i rozvaděče jako celku. Další výhodou je možnost instalace montážních příček a dalšího příslušenství skříně, které se objeví i ve specifikaci materiálu.



Obr. 24: Pohled na montážní desku navrhovaného rozvaděče

Konstrukce rozvaděče není banální záležitostí a má své zažitá pravidla a doporučení. Pro správný výběr skříně jsem využil návodu na specifikaci rozvaděče uvedeném v normě ČSN IEC/TR 61439-0: „Rozvaděče nízkého napětí – Část 0: Návod na specifikaci rozvaděčů“. Tato norma stanovuje doporučení, kterými je v případě výběru skříně dobré se řídit. Výběr je v případě tohoto pracoviště jednodušší, jelikož na rozvaděč nepůsobí žádné negativní vnější vlivy, nejedná se o nějakou náročnou aplikaci se zvláštními požadavky například o odolnost vůči elektromagnetickému rušení a bude použit na síťové napětí, na které jsou konstruovány všechny rozvaděče nízkého napětí. Připojení napájení z frekvenčního měniče nemá vliv na specifikaci rozvaděčové skříně. Pospojování skříně řeší problémy s vyzařováním rušení do okolí.

Při konstrukci je nutné dbát na stupeň ochrany rozvaděče před dotykem živých částí, vniknutí cizích těles a vody vyjádřený IP kódem. Stupeň ochrany nemusí být stejný ve všech částech rozvaděče, ale musí splňovat minimální krytí po instalaci rozvaděče IP2x. Živé části izolované vzduchem uvnitř skříně nebo za přepážkami musí splňovat krytí minimálně IPXXB. V případě, že je nutné odstranit instalované přepážky nebo otevřít rozvaděč musí tak být provedeno za použití klíče nebo nástroje, případně musí být odpojeno napájení živých částí. [20]

Konstrukce rozvaděče musí být provedena také tak, aby například prohlídky a nastavování relé, spouští a elektronických zařízení, výměny signálků a některé další činnosti jako měření a lokalizace poruch mohli být prováděny v provozu a pod napětím.

Umístění jednotlivých přístrojů je provedeno se snahou prostorově oddělit silovou a ovládací část rozvaděče, což je jednou ze zásad správné konstrukce rozvaděče. V tomto případě byly všechny prvky vyjma ovladačů, signálků a vypínačů umístěny na montážní desku rozvaděče. Montážní deska je demontovatelnou částí rozvaděče, uchycenou šrouby ke skříni. Na montážní desku se přístroje umísťují několika způsoby. První způsob umístění je umístění přístroje na nosné lišty, tzv. DIN lišty. Takto se umísťují modulární přístroje a přístroje menších rozměrů a váhy. Větší a těžší přístroje se upevňují na montážní desku šroubovým spojením. Propoje mezi přístroji se vyvazují do svazků, nebo se umísťují do kabelových žlabů. Při konstrukci jsem zvolil umístění do žlabů dimenzovaných na předpokládaný počet vodičů v něm umístěných s ohledem na lepší estetický výsledek, avšak s většími požadavky na prostor. Umístění žlabů a přístrojů bylo nutné volit tak, aby nezasahovali do konstrukčních částí skříně, případně aby nezakrývali otvory určené například pro zemnicí šrouby. Přístroje mají taktéž výrobcem definované montážní rozestupy. Jedná se o prostor kolem přístroje, ve kterém by se neměl nalézat žádný jiný předmět. V některých případech není možné montážní rozestupy dodržet, a tak je nutné zajistit nucenou cirkulaci vzduchu v rozvaděči, aby nedocházelo k překročení dovolené teploty uvnitř rozvaděče.

Zkonstruovaný rozvaděč bylo nutné ověřit výpočtem, zda zvládne svým povrchem odvést veškeré ztrátové teplo tak, aby nedocházelo k nárustu teploty uvnitř rozvaděče, nebo zda je nutné zajistit ventilaci rozvaděče. Pro tento výpočet jsem využil výpočetní program Rittal Therm. Tento program obsahuje databázi všech skříní tohoto výrobce, včetně jejich chladicího příslušenství. Po provedení výpočtu je možné konstatovat, že skříň dokáže všechno ztrátové teplo odvést svým povrchem a není tedy nutné chlazení. Výpočet navíc počítá s trvalým použitím rozvaděče, kdy už z určení rozvaděče je pravděpodobné, že rozvaděč bude provozován pouze příležitostně a po krátkou dobu. Celkové ztrátové teplo vyzařované přístroji do rozvaděče je v nejhorším případě použití přibližně 40 W a celkové ztrátové teplo odvedené povrchem rozvaděče je 83 W. Při okolní teplotě vzduchu 25 °C nepřesáhne teplota uvnitř rozvaděče teplotu 30 °C.

Výsledek výpočtu tvoří přílohu G této práce.

3 Realizace

Realizace pracoviště je součástí zadání této diplomové práce. V této části bude popsán celý proces předcházející realizaci projektu, vybraná varianta, její provedení a použití.

3.1 Fáze realizace

3.1.1 Fáze prvotního návrhu a výběru varianty

V první fázi byly provedeny dva možné návrhy realizace laboratorního měřicího pracoviště. K těmto návrhům byl i předložen předpokládaný rozpočet vytvořený z katalogových cen výrobců použitého materiálu. Katalogové ceny výrobce jsou obvykle vyšší než obvyklá cena výrobku na trhu. Tyto navržené varianty byly připomínkovány a projekt upraven dle dalších požadavků. Společně s upravenou dokumentací byl opět předložen předpokládaný rozpočet. Po odsouhlasení provedení pracoviště jsem vytvořil poptávku obsahující všechny potřebný elektromateriál a zaslal ji na obchodní oddělení regionálních firem zabývajících se prodejem elektromateriálu. Nejnižší cenu nabídla firma Elvac a.s. zabývajících se průmyslovou automatizací a velkoobchodním prodejem elektromateriálu. Pro srovnání je možné uvést cenu materiálu dle katalogových cen pro reléovou variantu ovládání 48 188,10 Kč a pro variantu s LOGem 51 574,10 Kč. Cena materiálu nabídnutá firmou Elvac pro reléovou variantu byla 36 136,53 Kč a pro variantu s LOGem 39 825,03 Kč. Z tohoto příkladu je patrné, že při poptávce materiálu bylo oproti katalogovým cenám v obou případech ušetřeno přibližně 12 000 Kč, což je úspora přibližně 20 %.

Na základě obdržených nabídek byla i přes mírně vyšší cenu vybrána varianta ovládání pracoviště pomocí PLC Siemens LOGO!. Tato varianta poskytuje variabilitu, díky které je možné ovládání přizpůsobit aktuálním požadavkům pouze pomocí programu. Potřebný materiál byl na základě nabídky objednán a následně dodán.

3.1.2 Výroba rozvaděče

Po dodání materiálu přišla na řadu výroba rozvaděče. Výroba rozvaděče probíhala v několika fázích. První fází byla příprava otvorů pro prvky rozvaděče umístěné dle návrhu rozmístění prvků, vytvořeném v Eplan ProPanel, na dveřích, pravé bočnici a na přírubové desce rozvaděče. Následovalo osazení montážní desky montážními DIN lištami a kabelovými žlaby. Po osazení přístrojů přišlo na řadu označení jednotlivých přístrojů označovacím štítkem, tak jak je definováno v normě ČSN EN 61439-1 ed. 2 Opr. 1, aby bylo možné identifikovat jednotlivé obvody a jejich ochranná zařízení. Identifikační štítky musí tvořit trvalé a čitelné označení. Označení použitá na štítcích muselo odpovídat označení dle ČSN EN 81346-2, která byla použita již při kreslení výkresové dokumentace.

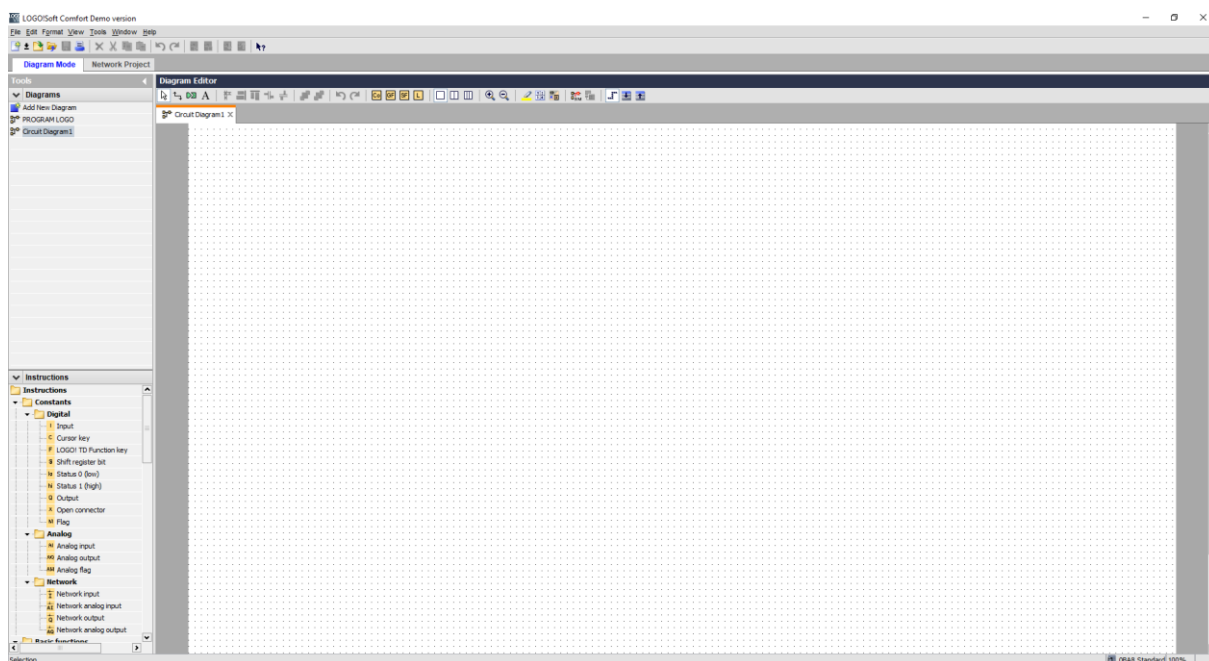
Další fází výroby bylo elektrické zapojení všech přístrojů umístěných v rozvaděči. Vzhledem k tomu, že zařízení lze zařadit mezi pracovní stroje, bylo tomu uzpůsobeno i barevné značení jednotlivých vodičů. Obvody nevypínané hlavním jističem, jakož i odvody před hlavním vypínačem jsou provedeny vodičem s oranžovou barvou izolace. Vodiče za hlavním vypínačem a fázové vodiče jsou provedeny vodičem černé barvy. Pro vodiče N a PE byly použity vodiče vyhrazených barev, a to světle modré a zeleno-žluté. Pro řídicí obvody 24 V DC jsou vodiče barvy tmavě modré, přičemž není barevně rozlišeno, zda se jedná o kladný nebo záporný pól. Všechny vodiče, vyjma například viditelných propojů mezi jističi musí být trvale označeny štítkem s cílem napojení pro jednodušší orientaci v zapojení.

Vzhledem k požadavku normy ČSN EN 61439-1 na spojitost uzemnění bylo nutné všechny neživé části rozvaděče spojit navzájem a připojit k ochrannému vodiči napájení nebo přes uzemňovací vodič k ochrannému pospojování budovy. Tento požadavek se týká vodivého spojení dveří rozvaděče s montážní deskou a konstrukcí rozvaděče a následnému propojení s ochranným vodičem napájení na můstku. V místech, které byly lakovány, byly použity speciální podložky narušující barvu tak, aby odpor spoje byl co nejmenší.

Po vizuální kontrole zapojení byl připojen přívodní kabel a bylo provedeno postupné oživení rozvaděče a provedeno měření. Kontrola neukázala žádné problémy v zapojení, a tak dalším krokem bylo naprogramování PLC LOGO!.

3.1.3 Programování PLC LOGO!

Programování PLC LOGO! probíhá pomocí logických funkcí a funkcí časovače zadávaných pomocí výběrových tlačítek na displeji řídicího modulu. Pro eliminaci chyb a možnost simulace navrženého programu jsem využil software LOGO!Soft Comfort V8.0.



Obr. 25: Programovací prostředí LOGO!Soft Comfort V8.0

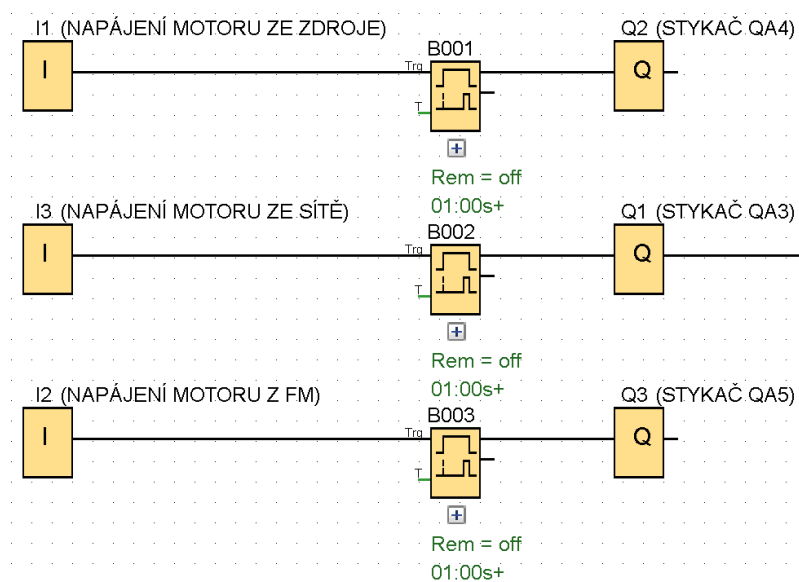
V nabídce programu jsou funkce pro práci s konstantami, kterými můžou být například digitální a analogové vstupy ale také vstupy signálů zasílaných po síti Ethernet. Dále obsahuje základní logické funkce, funkce čítače a časovače a funkce pro zpracování analogových signálů.

Ze všech těchto funkcí se skládá samotný program. Tyto funkce jsou dostupné pro všechny varianty provedení LOGO! a vytvořený program je možné pomocí komunikačního rozhraní nahrát do paměti zařízení, případně na paměťovou kartu rozšiřující paměť logického modulu.

Popis jednotlivých částí programu

Celý program lze rozdělit do několika částí. První částí programu je výběr napájení motoru.

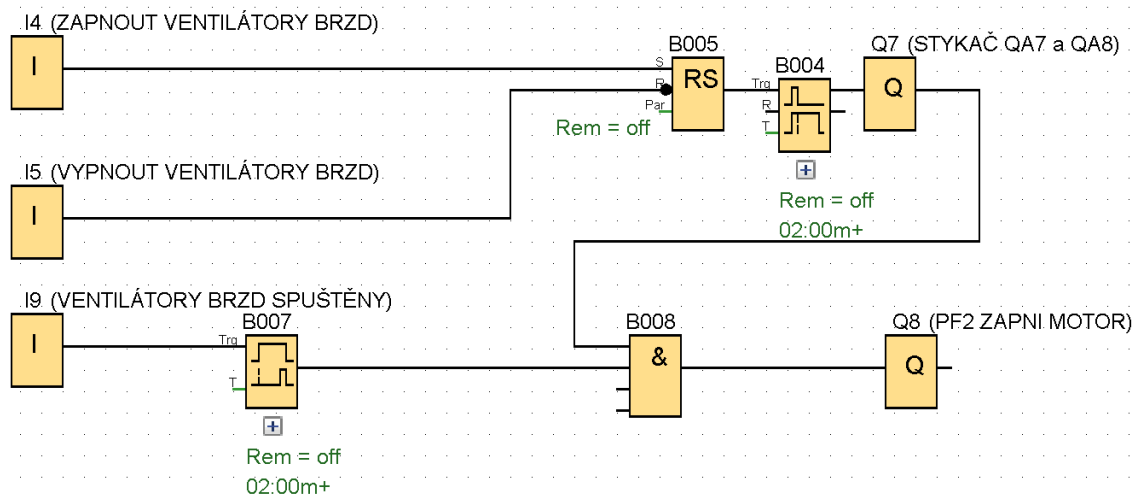
Výběr napájení motoru probíhá pomocí třípolohového přepínače umístěného na dveřích rozvaděče, jehož kontakty jsou zapojeny do digitálních vstupů. Otočením přepínače doleva je sepnut digitální vstup I1. Vzhledem k tomu, že se jedná o přepínač, kdy je hodnota držena po celou dobu, je vstup spojen s výstupem přes časovač, který provede časově zpožděnou aktivaci výstupu Q2 a sepne tak stykač -QA4. Časovač je zde použit k zajištění větší bezpečnosti, kdy nastavená doba 1 s je dostatečná k vypnutí jednoho stykače a sepnutí stykače druhého. V případě, že by zde časovač nebyl a nedošlo k dostatečně rychlému odpadu kontaktů jednoho stykače a zároveň došlo k sepnutí stykače druhého, došlo by k fázovému zkratu dvou různých zdrojů. Ve střední poloze je standardně aktivována možnost napájení ze sítě, kdy je sepnut vstup I3 a následně výstup Q1 zapojený na cívku stykače -QA3. Poslední možnost napájení je provedena otočením přepínače doprava, aktivací vstupu I2, čímž dojde k aktivaci výstupu Q3 zapojeného k cívce stykače -QA5.



Obr. 26: Výběr napájení motoru

Další částí programu je aktivace elektromagnetických práškových brzd. Aktivace ventilátorů práškových brzd je provedena stiskem bílého tlačítka „ZAPNOUT VENTILÁTORŮ BRZD“, jehož kontakt je přiveden do digitálního vstupu I4, čímž dojde k aktivaci bloku B5, kterým je přídržné relé, které aktivuje výstup Q7, tedy ministykače -QA7 a -QA8. Kontrola zapnutí brzd je provedena pomocí sdružení pomocných kontaktů stykačů -QA7 a -QA8 a jističů -FC6 a -FC7 zapojených do digitálního vstupu I9. Tato kontrola bohužel díky absenci signalizačních kontaktů brzd není schopna odhalit, zda není napájecí kabel brzdy odpojen.

Aktivací vstupu I9 dojde k odpočtu časového intervalu 2 minuty, což je doba daná výrobcem brzd nutná ke správné funkci brzd. Pokud i po uplynutí tohoto časového intervalu budou brzdy aktivní, dojde ke sepnutí výstupu Q8, k němuž je připojena signálka informující o možnosti zapnutí motoru. Dokud nebude výstup Q8 aktivní, není možné provádět spínání motoru. K deaktivaci brzd dojde po stisku černého tlačítka „VYPNOUT VENTILÁTORŮ BRZD“, které je zapojeno na vstup I5, čímž dojde opět po uplynutí časového intervalu 2 minut k resetování funkce bloku B5. V případě, že by byl motor provozován bez zapnutého ventilátoru práškových brzd, případně by došlo k vypnutí brzd ihned po ukončení testování, mohl by se prášek brzd nahromadit okolo hřídele a zablokovat ji. Odblokování brzd je poté možné pouze mechanickým působením síly na hřídel ve směru, nebo proti směru otáčení.



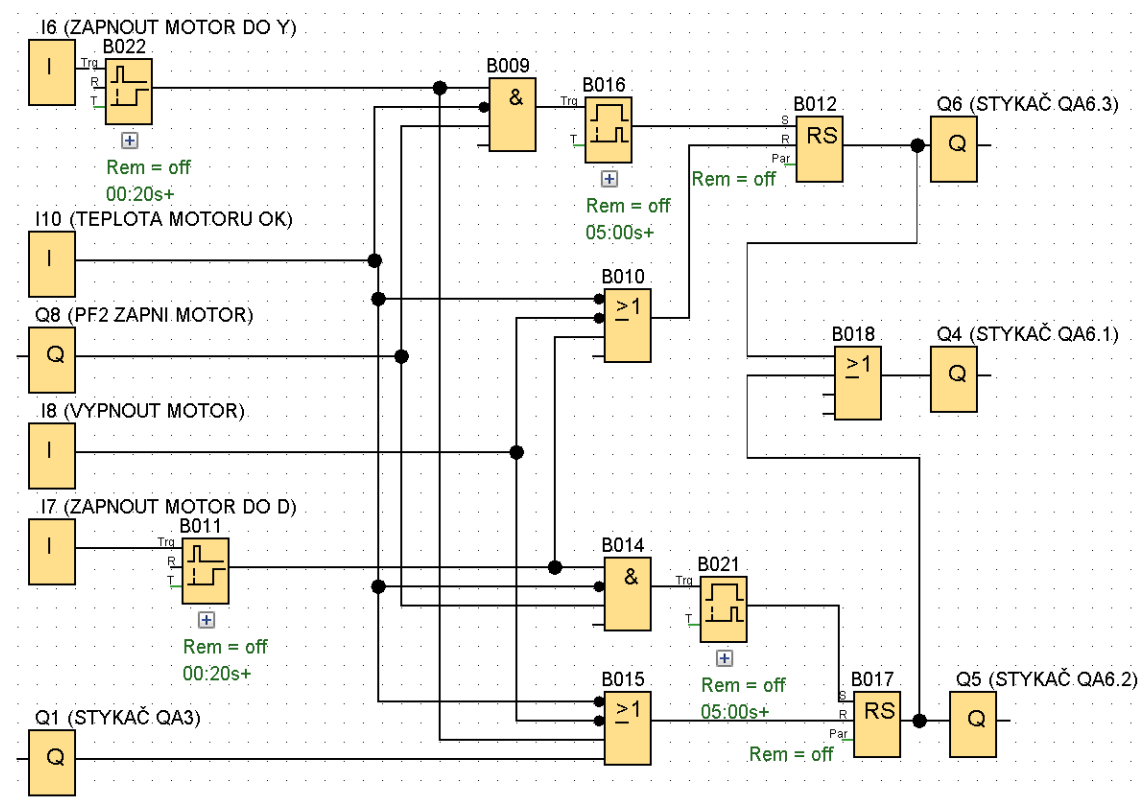
Obr. 27: Ovládání elektromagnetických práškových brzd

Nejsložitější částí programu je výběr zapojení vinutí motoru a jeho řízení. Do programu bylo nutné implementovat tepelný kontakt motoru, vazby na elektromagnetické práškové brzdy a také vazbu na vybranou variantu napájení.

Zapnutí motoru s vinutím zapojeným do hvězdy je provozování motoru při jeho jmenovitých parametrech. Aby bylo možné motor spustit, je nutné splnit řadu podmínek. První podmínkou je teplota motoru, která musí být nižší než 110°C, což je signalizováno tepelným kontaktem umístěným ve vinutí motoru a zapojeným na vstup I10. Tento kontakt je rozpínací, z čehož plyne, že při provozní teplotě je seplý a rozeplne až při překročení teploty 110°C. Pro požadovanou funkci je však nutné signál negovat, což je možné provést funkcí NOT nebo, tak jak je to řešeno v tomto případě, negováním vstupu bloků logických funkcí. Zapnutí motoru v zapojení do hvězdy je realizováno stiskem bílého tlačítka „ZAPNOUT MOTOR DO HVĚZDY“ zapojeným do vstupu I6. Aby však došlo k zapnutí, je nutné tlačítko po dobu přibližně 0,5 s držet. Pokud bude tlačítko stisknuto na kratší dobu, PLC na něj nebude reagovat. Toto opatření má čistě praktický význam, kdy po náhodném dotyku nedojde žádné akci. Další podmínkou spuštění motoru jsou aktivované brzdy po dobu minimálně 2 minuty, což je signalizováno signálkou. Vstup I6, I10 a výstup Q8 tvoří povolovací podmínku spuštění. Při splnění podmínek dojde k aktivaci stykače spojující konce vinutí do hvězdy -QA6.3 výstupem Q6 a zároveň hlavního stykače -QA6.1 výstupem Q4. Vypnutí motoru může být provedeno několika způsoby. Prvním způsobem je stisk černého tlačítka „VYPNOUT MOTOR“. Po stisku dojde k okamžitému odpojení napájení od motoru. Další příčiny vypnutí jsou závislé na vstupních podmínkách. K vypnutí motoru taktéž dojde okamžitě po vypnutí ventilátorů práškových brzd a také při překročení teploty motoru.

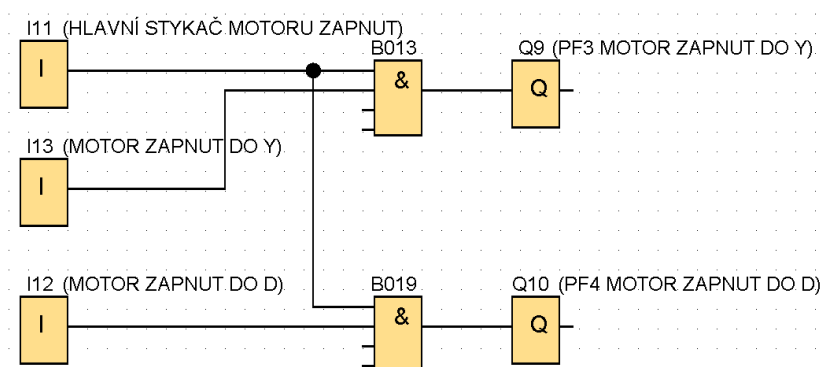
Zapnutí motoru do trojúhelníka se provádí stiskem bílého tlačítka „ZAPNOUT MOTOR DO TROJÚHELNÍKA“ po dobu přibližně 0,5 s zapojeným na vstup I7. Pro zapnutí je nutné splnit stejné podmínky jako v případě spouštění motoru v zapojení vinutí do hvězdy. Při splnění všech podmínek dojde k aktivaci výstupu Q5, ke kterému je připojen stykač -QA6.2 a také k aktivaci výstupu Q4 se zapojeným hlavním stykačem -QA6.1. Vypnutí se provádí stejným způsobem jako u varianty výše.

Do blokačních podmínek bylo oproti variantě zapojení motoru do hvězdy přidána blokační podmínka spuštění motoru do trojúhelníka v případě, že je motor napájen ze sítě. Pokud by bylo tlačítko při napájení ze sítě stisknuto, dojde automaticky k vypnutí motoru. Blokační podmínka není uplatněna při napájení z regulovaného třífázového zdroje nebo frekvenčního měniče, je však velmi důležité dbát na velikost napájecího napětí.



Obr. 28: Řízení motoru

Poslední částí programu je signalizace spuštění motoru. Pro tento účel byly použity pomocné kontakty stykačů připojené do digitálních vstupů PLC. Pro signalizaci je využito vstupních signálů a logické funkce AND. Pokud je aktivní vstup I11, stykač -QA6.1, a zároveň I13, stykač -QA6.3, je signalizován signálkou připojenou k výstupu Q9 běh motoru v zapojení do hvězdy. V případě, že je aktivní vstup I12, stykač -QA6.2, a zároveň vstup I11, stykač -QA6.1, je signalizován běh motoru signálkou připojenou k výstupu Q10 v zapojení trojúhelníka.



Obr. 29: Signalizace běhu motoru

Takto připravený a odsimulovaný program byl následně naprogramován tlačítky na řídicím modulu do vnitřní paměti a odzkoušen bez připojeného silového napájení motoru.

3.1.4 Zapojení pracoviště

Vyrobený rozvaděč s naprogramovaným PLC byl přesunut do učebny, ve které bude trvale instalovaný, kde došlo ke spojení s laboratorním systémem Langlois. Pro připojení napájení motoru byl použit flexibilní stíněný kabel 4G2,5 + 2x0,5, kde silové vodiče byly připojeny ke svorkám vinutí motoru a dvě, zvláště odstíněné žíly byly použity pro tepelný kontakt motoru. Originální napájecí kabely elektromagnetických práškových brzd byly nahrazeny novými tak, aby bylo možné zapínání ventilátorů brzd realizovat z rozvaděče. Pro připojení napájení brzd byl použit kabel 3G1,5 s EURO konektorem.

Systém napájení motoru a brzd byl poprvé prakticky odzkoušen při odpojených měřicích přístrojích, aby v důsledku například chyby v zapojení, případně nějaké neočekávané chybě programu, nedošlo k jejich poškození. Po úspěšném testu byly připojeny i měřicí přístroje.

Měřicí přístroje jsou propojeny originálními měřicími vodiči pro měření všech potřebných parametrů.

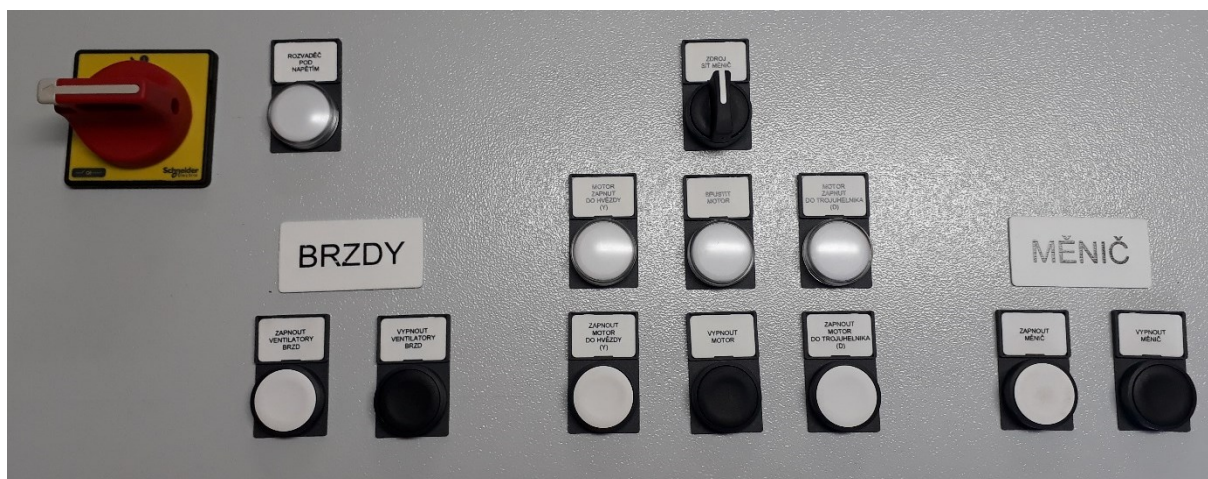
3.2 Obsluha měřicího pracoviště

Laboratorní pracoviště se systémem Langlois se skládá ze dvou částí. První část tvoří ovládací rozvaděč s měřicími přístroji a druhou samotný systém pohonu. Celá sestava je zobrazena na obrázku č. 30.



Obr. 30: Laboratorní sestava pro měření účinnosti asynchronního motoru

Ovládání celého pracoviště se provádí z ovládacího rozvaděče. Zařízení se uvede do provozu zapnutím hlavního vypínače označeného „Hlavní vypínač“. Po zapnutí hlavního vypínače dojde k zapnutí napájení celého rozvaděče, ze kterého jsou napájeny všechny zařízení připojené k rozvaděči. Měřicí přístroje jsou k napájení připojeny pomocí zásuvek umístěných na zadní straně rozvaděče. Připojení napájení a zapnutí hlavního vypínače je signalizováno signálkou vedle hlavního vypínače s označením „ROZVADĚČ POD NAPĚTÍM“.



Obr. 31: Pohled na ovládací prvky rozvaděče

Před samotným měřením je nejprve nutné zapnout ventilátor práškových brzd, který musí být zapnutý minimálně 2 minuty před zahájením brzdění. Zapnutí ventilátorů brzd se provede stiskem bílého tlačítka umístěného na ovládacím pultu pod velkým označovacím štítkem „BRZDY“ s označením „ZAPNOUT VENTILÁTOR BRZD“. Po stisku tohoto tlačítka dojde k zapnutí ventilátorů práškových brzd, přičemž motor po dobu přibližně 2 minut nejde spustit. Po uplynutí tohoto intervalu se rozsvítí signálka „ZAPNOUT MOTOR“, která signalizuje možnost zapnutí motoru. Ventilátory práškových brzd lze vypnout stiskem černého tlačítka „VYPNOUT VENTILÁTOR PRÁŠKOVÝCH BRZD“, přičemž ventilátory budou zapnuty ještě 2 minuty. Po tuto dobu je důležité nevypínat hlavní vypínač, případně vytahovat zástrčku napájení ze zásuvky. Pokud byl při stisku vypínacího tlačítka ventilátorů brzd zapnutý motor, dojde k odpojení napájení a samovolnému doběhu motoru.

Motor má tři možnosti napájení. První možností je napájení přímo ze sítě. Tuto možnost aktivujete ponecháním otočeného přepínače označeného „ZDROJ SÍŤ MĚNIČ“ ve střední poloze. Pro možnost napájení z regulovaného třífázového zdroje je nutné přepnout tento přepínač do polohy vlevo a připojit výstup zdroje přes přívodku umístěnou na pravé straně k rozvaděči. Poslední možností je napájení motoru z frekvenčního měniče. Pro tuto možnost je nutné přepnout otočný přepínač do polohy vpravo a zapnout vypínač na pravém boku rozvaděče.

Po výběru napájení je možné motor spustit, a to jak v zapojení vinutí motoru do hvězdy tlačítkem „ZAPNOUT MOTOR DO HVĚZDY (Y)“, případně motor zapnout s vinutím zapojeným do trojúhelníka tlačítkem „ZAPNOUT MOTOR DO TROJÚHELNÍKA (D)“. Výběr je signalizován signálkou nad příslušným tlačítkem.

Ovládání frekvenčního měniče se provádí samostatnými tlačítky „ZAPNOUT MĚNIČ“ a „VYPNOUT MĚNIČ“. Nad těmito tlačítky je umístěn velký označovací štítek s označením „MĚNIČ“.

V případě napájení z regulovaného zdroje napětí nebo frekvenčního měniče je nutné dbát na správné nastavení velikosti napětí s ohledem na zapojení motoru! Možnost spuštění motoru zapojeného do trojúhelníka je pro napájení ze sítě zablokována.

V případě mimořádné události lze napájení systému Langlois vypnout hlavním vypínačem červené barvy umístěným na žlutém reflexním pozadí, případně vytáhnutím zástrčky napájení ze zásuvky. V obou případech dojde k odpojení napájení všech částí systému.

Samotné měření probíhá po zapnutí práškových brzd a motoru pomocí měřících přístrojů umístěných vedle pultu měřícího pracoviště. Měřicí přístroj DIGIWATT měří příkon, proud a napětí. Na měřícím přístroji GRANMECA lze odečítat otáčky motoru, moment, jakým je motor zatěžován a výkon motoru. Přístroj MECASIM je určen k simulaci různých zatížení motoru, které je vytvářeno práškovými brzdami. Pro jednodušší odečet všech hodnot jsou měřicí přístroje propojeny s jednotkou VISIREAL a spojeny s počítačem, na kterém je nainstalován příslušný software.

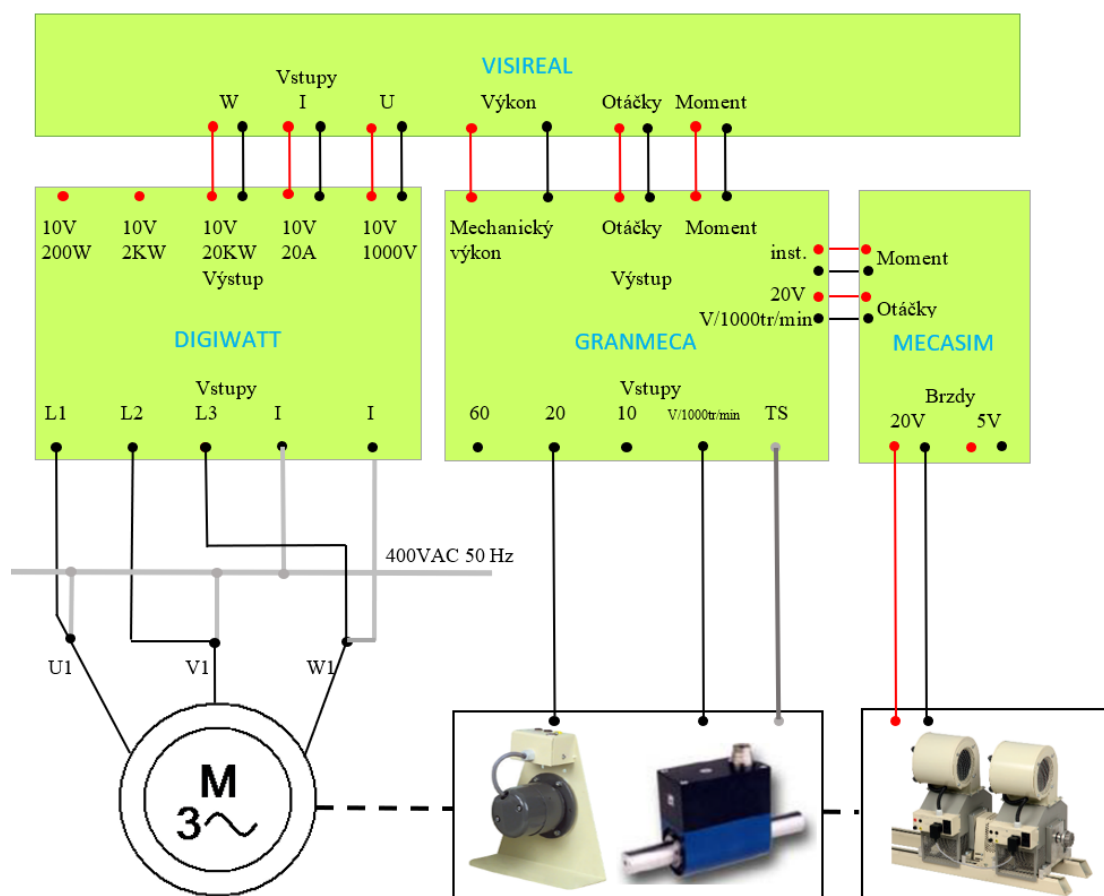
Provozní vypnutí pracoviště se provádí nejprve stiskem tlačítka „*VYPNOUT MOTOR*“, následně stiskem tlačítka „*VYPNOUT VENTILÁTORŮ BRZD*“ a následně po dvouminutovém doběhu ventilátorů brzd hlavním vypínačem s označením „*HLAVNÍ VYPÍNAČ*“, který celé pracoviště uvede do beznapěťového stavu.

Návod k obsluze tvoří přílohu **D** této práce.

4 Ověření účinnosti asynchronního motoru

Posledním bodem zadání této diplomové práce je ověření výrobcem uváděné účinnosti motoru pomocí realizovaného laboratorního měřicího pracoviště za použití dodaných měřicích přístrojů.

Schéma zapojení měřicího obvodu



Obr. 32: Schéma zapojení měřicího obvodu

Použité přístroje

Sestava pohonu Langlois

Digitální multimetr DIGIWATT

Měřič otáček a momentu GRANMECA

Simulátor zatížení MECASIM

Real – time zobraz. jednotka VISIREAL

Podmínky měření

Měření proběhlo po zapojení měřících přístrojů dle schématu z obr. 32. Měření účinnosti motoru proběhlo při napájení motoru ze sítě v zapojení vinutí do hvězdy. Simulátor zatížení MECASIM byl použit v manuálním režimu, kdy nebyla využita žádná z možností simulace zatížení. Měření bylo zaznamenáváno real-time zobrazovací jednotkou VISIREAL připojenou k počítači s příslušným softwarem. Teplota primárního chladiva, tedy vzduchu v místnosti byla v době měření 24 °C.

Naměřené hodnoty

Tabulka 5: Naměřené a vypočtené hodnoty

Číslo měření	Napětí na svorkách motoru	Proud v 1. fázi	Příkon	Mechanický moment	Otáčky motoru	Mechanický výkon	Účinnost motoru
-	U (V)	I (A)	P ₁ (W)	M (Nm)	n (min ⁻¹)	P _m (W)	η (%)
1	425	3,49	894	4,18	1490	652	72,93
2	425	3,99	1704	9,21	1483	1430	83,93
3	424	4,45	2213	12,32	1478	1906	86,13
4	424	4,96	2709	15,29	1473	2359	87,07
5	424	5,43	3112	17,68	1469	2720	87,38
6	424	6,04	3618	20,65	1464	3165	87,49
7	423	6,43	3921	22,41	1460	3427	87,40
8	423	6,90	4268	24,39	1457	3721	87,18

Výpočet účinnosti motoru

Výpočet účinnosti motoru pro 100 % zatížení motoru

$$\eta = \frac{P_m}{P_1} \cdot 100 = \frac{3165}{3618} \cdot 100 = 87,49 \% \quad (1.1)$$

Zhodnocení měření

Měřením účinnosti byla ověřována informace výrobce motoru, který uvádí třídu účinnosti motoru IE3, kdy při napájení ze sítě 400 V AC 50 Hz a při jmenovitém zatížení je účinnost 87,7 %. Změřená hodnota přímou metodou při napájecím napětí 424 V, které je v toleranci ± 10 % a jmenovitém zatížení motoru momentem 20 Nm bylo 87,49 %. Účinnost motoru při 75 % jmenovitého zatížení je v katalogovém listu uvedena 88,2 %. Změřená účinnost při 75 % jmenovitého zatížení byla 87,07 %. Hodnota účinnosti uvedená na štítku motoru splňuje minimální požadovanou hodnotu danou normou ČSN EN 60034-30-1 pro 4 pólový motor 87,7 %. Změřená hodnota účinnosti je mírně nižší, což může být způsobeno chybou měření měřících přístrojů, kdy příkon je určován s chybou 2 %. Další chyby měření mohou být způsobeny převodem napětí z tachogenerátoru na hodnotu otáček měřícím přístrojem a chybou měření snímačem momentu. Po přičtení odchylky měření, změřené hodnoty účinnosti motoru splňují minimální hodnotu účinnosti danou normou.

Tento způsob měření za použití měřících přístrojů dodaných firmou Langlois je možné uvažovat pouze jako orientační. Měřící přístroje firmy Langlois nesplňují požadavky normy ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 „*Točivé elektrické stroje – Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla*“ na přesnost měřících přístrojů při přímém měření účinnosti motoru. Dle ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 musí mít měřící přístroje elektrických veličin při přímém měření třídu přesnosti 0,2 a celková nejistota měření nesmí přesáhnout hodnotu 0,2 % z odečtené hodnoty. Nejistota měření příkonu je 2 %, tedy hodnota 10 krát vyšší než je požadováno normou. Pro splnění požadavků normy je nutné provést měření měřícími přístroji s vyšší přesností měření.

Při měření účinnosti motoru byl navíc zjištěn rozpor mezi výrobním štítkem motoru, popisem svorkovnice motoru a katalogovým listem použitého motoru. Katalogový list motoru uvádí jmenovitý proud při napájecím napětí 400 V AC 50 Hz v zapojení vinutí do hvězdy $I_n = 5,9$ A, výrobní štítek motoru při stejných podmínkách uvádí proud $I_n = 6,0$ A a na svorkovnici motoru je uveden jmenovitý proud $I_n = 6,1$ A. Tento rozpor platí i pro zapojení vinutí motoru do trojúhelníku při sníženém napětí 230 V AC 50 Hz. Rozpor se netýká zapojení motoru na napájecí síti s kmitočtem 60 Hz. Katalogový list motoru tvoří přílohu číslo **F** práce.

5 Závěr

První, teoretická část této práce popisovala problematiku ztrát asynchronního motoru a jejich možnosti omezení. Na základě studia jsem zjistil, že problematika ztrát asynchronního motoru je velmi náročnou a obsáhlou disciplínou, která si zaslouží hlubší zkoumání. Snaha výrobců motorů snižovat ztráty v motoru za účelem zvýšení jeho účinnosti je jedním ze způsobů, jak ušetřit značné množství elektrické energie. Ke zvyšování účinnosti jistě napomáhá Evropská unie svým nařízením číslo 640/2009 a také soubor norem ČSN EN 60034, které stanovují požadavky na elektrické motory. Účinnost motorů však nepůjde zvyšovat do nekonečna a jednou dojde do stádia, kdy už vyšší účinnosti nebude z technologických, materiálových nebo fyzikálních důvodů možné dosáhnout a bude nutné vymyslet jiný fyzikální princip funkce motoru.

Druhá část zabývající se návrhem pracoviště je pro mne jako budoucího elektroprojektanta určitě dobrou zkušeností do dalšího profesního života. Při návrhu pracoviště jsem musel respektovat elektrotechnické normy, převážně velmi obsáhlý soubor norem ČSN 33 2000 a jakožto i nařízení vlády týkající se tvorby projektové dokumentace. Při tvorbě projektu a jeho úpravách dle dalších požadavků na měřicí pracoviště, které vyvstaly v průběhu řešení projektu, krásně ilustrují, že projekt se ve svém průběhu vyvíjí a mění, což je v projekční praxi velmi časté. Při návrhu bylo taktéž zjištěno, že z důvodu „nedostatečných“ elektrických parametrů stávajícího přístrojového vybavení katedry, není možné provádět přímá měření účinnosti v souladu s požadavky normy ČSN EN 60034-2-1 ed.2, ale pouze demonstračně, což je ale pro potřeby výuky dostačující.

Třetí, realizační část, byla pro mne asi nejlepší zkušeností pro budoucí výkon povolání elektroprojektanta. V první řadě zde bylo rozhodováno o vhodné variantě provedení ovládání, kde byly diskutovány výhody, případně nevýhody, jednoho či druhého způsobu ovládání. Pro nesporné výhody bylo vybráno pro realizaci ovládání pomocí programovatelného logického modulu LOGO!, které svou variabilitou umožňuje v průběhu životnosti pracoviště reagovat změnou programu na aktuální požadavky osob provádějících měření. Vzhledem k tomu, že bylo nutné nakoupit všechn potřebný materiál na realizaci pracoviště, vyzkoušel jsem si, že i na základě poptávky rozeslané e-mailem na různé dodavatele elektroinstalačního materiálu, je možné uspořit podstatnou část nákladů, v tomto případě přibližně 20 %, a ušetřit spoustu času objednáváním jednotlivých položek u různých dodavatelů, ke kterým by následně bylo nutné ještě přičíst náklady na dopravu. Výroba rozvaděče mne taktéž překvapila svou časovou náročností a potřebou velkého množství nářadí.

Uvedení pracoviště do provozu provázely testy správnosti zapojení a následné programování programovatelného logického modulu LOGO!. S programováním LOGa jsem se při realizaci setkal poprvé a bylo pro mne ze začátku trochu oříškem. Pomohl mi však software LOGO!Soft Comfort V8.0, který obsahuje i ukázkové programy a možnost simulace vytvořeného programu. Po odzkoušení programu v simulaci jsem díky absenci komunikačního rozhraní logického modulu tvořil program pomocí tlačítek a displeje modulu, což bylo sice zdoluhavé, ale je to dobrá zkušenost, jelikož v praxi není možné mít u sebe pokaždé PC vybavené příslušným softwarem a drobné změny v programu lze

takto provádět. Po vytvoření programu a jeho praktickém odzkoušení byl zpracován návod k obsluze, který doufám bude dobře sloužit budoucím uživatelům měřicího pracoviště.

Poslední část práce věnovaná měření účinnosti asynchronního motoru měla potvrdit informaci výrobce, že je motor vyrobený v třídě účinnosti IE3. Vzhledem k tomu, že se jedná o motor malého výkonu, je možné jeho účinnost měřit přímou metodou. Bohužel měřicí přístroje dodané k soustrojí firmou Langlois nesplňují požadavky normy ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 na přesnost měření. Tyto přístroje mají 10 krát vyšší procentní odchylku měření než je požadavek normy. Ze změřených hodnot je patrné, že motor by mohl být zařazen do třídy účinnosti IE3 až na základě přičtení 2 % chyby měření měřících přístrojů.

Měřicí pracoviště bylo předáno v provozuschopném stavu a je možné na něm měření bezpečně provádět. Věřím, že měřicí pracoviště bude dobře sloužit dalším studentům i pedagogům katedry elektrotechniky fakulty Elektrotechniky a informatiky Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava.

6 Seznam použité literatury

- [1] CHMELÍK, Karel. ASYNCHRONNÍ A SYNCHRONNÍ ELEKTRICKÉ STROJE. OSTRAVA: VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [2] BAŠTA, Jan, Vojtěch KULDA a Jiří MĚŘIČKA. MĚŘENÍ NA ELEKTRICKÝCH STROJÍCH: I. VŠEOBECNÁ ČÁST. PRAHA: STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1959
- [3] BAŠTA, Jan, Vojtěch KULDA a František PAVLÁSEK. MĚŘENÍ NA ELEKTRICKÝCH STROJÍCH: 4. MĚŘENÍ NA INDUKČNÍCH STROJÍCH. PRAHA: STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1962.
- [4] HUDECZEK, Mečislav a Jozef GÜTTLER. ZVYŠOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI ASYNCHRONNÍCH ELEKTROMOTORŮ VČETNĚ POHÁNĚNÝCH STROJŮ (Technická diagnostika). Albrechtice: Hudeczek Service, 2011. ISBN 978-80-905032-0-5.
- [5] LYÓSCA, Štefan a Jozef GÜTTLER. MĚŘENÍ NA ASYNCHRONNÍM MOTORU. PRAHA: SNTL - NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1972.
- [6] Princip - asynchronní motor [online]. [cit.2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/princip-asynch-motoru>
- [7] Přehled a zapojení motorů [online]. [cit.2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/text-prehled-a-zapojeni-motoru/>
- [8] MLČÁK, Tomáš. ELEKTROTECHNIKA PRO FMFI. OSTRAVA: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2601-1.
- [9] CAHA, Zdeněk a Miroslav ČERNÝ. Elektrické pohony. PRAHA: STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1990.
- [10] PARASILITI, Francesco a Paolo BARTOLDI. Energy Efficiency in Motor Driven Systems. Berlín: Springer-Verlag, 2003. ISBN 3-540-00666-4.
- [11] NAŘÍZENÍ KOMISE (ES) č. 640/2009 ze dne 22. července 2009, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2005/32/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign elektromotorů [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: https://eurlex.europa.eu/legalcontent/CS/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2009.191.01.0026.01.CES&toc=OJ:L:2009:191:TOC
- [12] ČSN EN 60034-1 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti. PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [13] ČSN EN 60034-2-1 ed. 2: Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla). PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [14] ČSN EN 60034-30-1: Točivé elektrické stroje - Část 30-1: Třídy účinnosti střídavých motorů provozovaných ze sítě (IE kód). PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

- [15] ČSN CLC/TS 60034-31: Točivé elektrické stroje - Část 31: Výběr energeticky účinných motorů včetně aplikací s proměnnými otáčkami - Návod k použití.
PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [16] ČSN 33 2000-5-51 ed. 3 Z2: Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení - Všeobecné předpisy.
PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [17] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č. 176/2008 Sb.: Nařízení vlády o technických požadavcích na strojní zařízení, ročník 2008, číslo 176.
- [18] Směrnice EU 2009/125/ES a norma ČSN EN (IEC) 60034 – 30, Nová definice, nové třídy účinnosti [online]. [cit.2019-03-25].
Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/legislativa/smernice-eu-2009-125-es-a-norma-csn-en-iec-60034-30-nova-definice-nove-tridy-ucinnosti>
- [19] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č. 320/2017 Sb.: Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 176/2008 Sb., o technických požadavcích na strojní zařízení, ve znění pozdějších předpisů. ročník 2017, číslo 320.
- [20] ČSN EN 61439-1 ed. 2 Opr. 1: Rozváděče nízkého napětí - Část 1: Všeobecná ustanovení.
PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [21] ČSN IEC/TR 61439-0: Rozváděče nízkého napětí - Část 0: Návod na specifikaci rozváděčů.
PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [22] ČSN EN 81346-1: Průmyslové systémy, instalace a zařízení a průmyslové produkty - Zásady strukturování a referenční označování - Část 1: Základní pravidla.
PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [23] ČSN EN 81346-2: Průmyslové systémy, instalace a zařízení a průmyslové produkty - Zásady strukturování a referenční označování - Část 2: Třídění předmětů a kódy tříd.
PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [24] ČSN EN 60073 ed. 2: Základní a bezpečnostní zásady pro rozhraní člověk-stroj, značení a identifikaci - Zásady kódování sdělovačů a ovládačů.
PRAHA: Český normalizační institut, 2003.
- [25] ČSN 33 2000-5-54 ed. 3 Z1 Opr. 1: Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-54: Výběr a stavba elektrických zařízení - Uzemnění a ochranné vodiče.
PRAHA: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [26] Electrical Laboratory Equipment: Katalog laboratorního vybavení Langlois. Z.I. du Haut-Vigneau.

7 Seznam příloh

Příloha A: Varianta laboratorního pracoviště s reléovým řízením	(počet stran 31)
Příloha B: Varianta laboratorního pracoviště s řízením pomocí PLC LOGO!	(počet stran 37)
Příloha C: Technická zpráva	(počet stran 10)
Příloha D: Návod k obsluze a měření	(počet stran 4)
Příloha E: Foto vyrobeného rozvaděče	(počet stran 5)
Příloha F: Katalogový list motoru	(počet stran 1)
Příloha G: Protokol o výpočtu oteplení rozvaděče	(počet stran 2)